

## Vertieferarbeit

Auswertung von Experimenten zum  
Schwingungsverhalten an spröden  
und duktilen Werkstoffen und  
Entwicklung eines Versuchskonzepts  
für Glas

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen



Betreuer  
Dipl.-Ing. K. Boxheimer  
Prof. Dr.-Ing. J.-D. Wörner

November 2002

|  |           |
|--|-----------|
| <b>EINLEITUNG .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1 ZYKLISCHE BEANSPRUCHUNG (EINFÜHRUNG).....</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1 WÖHLERLINIE .....  | 4         |
| 1.1.1 Versuchsdurchführung .....   | 4         |
| 1.1.1.1 Treppenstufen-Verfahren (Staircase-Verfahren).....   | 5         |
| 1.1.2 Versuchsauswertung .....   | 6         |
| 1.1.2.1 Mittelwerte und Streuungen der Zeitfestigkeit.....   | 6         |
| 1.1.2.2 Probit-Verfahren .....   | 7         |
| 1.1.3 Grenz-Schwingungszahl (Grenz-Lastspielzahl) .....  | 7         |
| <b>2 DER WERKSTOFF STAHL.....</b>  | <b>8</b>  |
| 2.1 ALLGEMEINES BRUCHVERHALTEN DER STAHL-PROBEKÖRPER .....   | 8         |
| 2.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN VOLLSTÄBEN AUS ST 37.....   | 9         |
| 2.2.1 Werkstoff und Probenabmessungen .....  | 9         |
| 2.2.2 Versuchsbeschreibung.....  | 9         |
| 2.2.3 Versuchsergebnisse .....   | 11        |
| 2.2.3.1 Die Dauerfestigkeiten des Vollstabes und deren Beeinflussung durch Oberflächenbearbeitungen und Glühbehandlungen ..... | 11        |
| 2.2.3.2 Temperaturverhalten der Proben bei Dauerbeanspruchung .....  | 13        |
| 2.2.3.3 Bruchlage und Bruchfläche.....   | 13        |
| 2.2.3.4 Streuwerte.....  | 14        |
| 2.3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN VOLLSTÄBEN AUS HOCHFESTEN BAUSTÄHLEN .....  | 14        |
| 2.3.1 Werkstoff und Probenabmessungen .....  | 14        |
| 2.3.2 Versuchsbeschreibung.....  | 15        |
| 2.3.3 Versuchsergebnisse .....   | 16        |
| 2.3.3.1 Mittelwerte der Dauerfestigkeiten.....   | 16        |
| 2.3.3.2 Mittelwerte der Zeitfestigkeiten .....   | 18        |
| 2.3.3.3 Diskussion der Walzhautkerbwirkung .....   | 19        |
| 2.3.3.4 Temperaturänderungen der Proben infolge Dauerbelastung.....  | 20        |
| 2.3.3.5 Bruchlage und Bruchfläche.....   | 20        |
| 2.3.3.6 Streuwerte und Mittelspannungsempfindlichkeit.....   | 20        |
| 2.4 ANMERKUNG ZUM EINFLUSS DES UMGEBENDEN MEDIUMS AUF STAHL .....  | 21        |
| <b>3 DER WERKSTOFF KERAMIK.....</b>  | <b>22</b> |
| 3.1 KERAMISCHE EIGENSCHAFTEN .....   | 22        |
| 3.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN VOLLSTÄBEN AUS $Al_2O_3$ UND $Si_3N_4$ .....  | 23        |
| 3.2.1 Werkstoffe und Probenabmessungen .....   | 23        |
| 3.2.2 Versuchsbeschreibung.....  | 25        |
| 3.2.3 Versuchsergebnis.....  | 27        |
| 3.2.3.1 Mittelwerte und Streuungen der Dauerfestigkeiten .....   | 27        |
| 3.2.3.2 Vergleich der Dauerfestigkeiten und Bruchfestigkeiten.....   | 28        |
| 3.2.3.3 Bruchverhalten der Keramik-Probekörper .....   | 29        |
| 3.2.3.4 Mittelspannungsempfindlichkeit.....  | 29        |
| 3.3 ERGEBNISSE WEITERER KERAMIK-WERKSTOFFE.....  | 29        |
| 3.3.1 Reaktionsgesintertes $Si_3N_4$ (RBSN) .....  | 29        |
| 3.3.2 Aluminiumoxid-Sinterkörper (BIOLOX®).....  | 30        |

|                    |   |           |
|--------------------|---|-----------|
| 3.3.3              | Dichtes polykristallines Aluminium.....                                   | 31        |
| 3.3.4              | Zusammenfassung bisheriger Erkenntnisse .....                             | 31        |
| <b>4</b>           | <b>VERGLEICH ZWISCHEN SPRÖDEN UND DUKTILEN MATERIALIEN.....</b>           | <b>33</b> |
| 4.1                | PROBENANZAHL, BELASTUNGSFREQUENZ, GRENZ-SCHWINGSPIELZAHL .....            | 33        |
| 4.2                | DAUERFESTIGKEITEN.....  | 34        |
| 4.3                | WALZHAUTKERBWIRKUNG UND STABKANTENEINFLUSS.....                           | 38        |
| 4.4                | BRUHLAGE UND BRUCHFLÄCHE .....  | 39        |
| 4.5                | FREQUENZABHÄNGIGKEIT .....  | 39        |
| 4.6                | STREUWERTE UND MITTELSPANNUNGSEMPFINDLICHKEIT .....                       | 39        |
| <b>5</b>           | <b>VERGLEICHE MIT GLAS .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>6</b>           | <b>VERSUCHSKONZEPT ZUR UNTERSUCHUNG DER DAUERFESTIGKEIT VON GLAS.....</b> | <b>42</b> |
| <b>7</b>           | <b>VERWENDETE SYMBOLE.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>8</b>           | <b>BEGRIFFSERKLÄRUNGEN .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>9</b>           | <b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>ANHANG.....</b> |   | <b>57</b> |
|                    | TABELLEN .....  | 58        |
|                    | ABBILDUNGEN .....   | 63        |
|                    | PLASTE UNTER ZYKLISCHER BEANSPRUCHUNG .....                               | 87        |

## Einleitung

Der Werkstoff Glas wird in zunehmendem Maße als konstruktives Element im Bauwesen anerkannt und muss somit auch zyklischen Beanspruchungen standhalten.

Inhalt dieser Vertieferarbeit ist die Untersuchung der experimentell ermittelten Schwingfestigkeit verschiedener Materialien, um Schlüsse auf ein Versuchskonzept zur Untersuchung der Schwingfestigkeit von Glas zu ziehen.

Die Auswahl der Materialien beschränkte sich auf Stahl und Keramik, da nur für diese Materialien geeignete Quellen gefunden werden konnten. Durch diese beiden Werkstoffe war ein Vergleich zwischen sprödem und duktilem Werkstoffverhalten möglich.

Im Zuge dieses Textes werden zunächst vorhandene Ergebnisse der Materialien Stahl und Keramik dokumentiert. Anschließend werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Werkstoffen herausgearbeitet, Übertragungsmöglichkeiten auf den Werkstoff Glas erwogen und schlussendlich ein Versuchskonzept zur Ermittlung der Schwingfestigkeit von Floatglas vorgeschlagen.

# 1 Zyklische Beanspruchung (Einführung)

## 1.1 Wöhlerlinie

Für die Bezeichnung der Widerstandsfestigkeit von zyklisch belasteten Werkstoffen und Bauteilen werden die Begriffe Schwingfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Betriebsfestigkeit zu gleichen Teilen verwendet. Zur Dimensionierung schwingend beanspruchter Werkstoffe und Bauteile müssen deren Widerstandskurven experimentell erzeugt werden. Diese Spannungs-Schwingspieldiagramme, Lebensdauerlinien genannt, können für bisher nicht auf diesem Gebiet untersuchte Werkstoffe nur über umfangreiche Versuche für einzelne Bauteile ermittelt werden. Die Wöhlerlinien sind als Einstufen-Versuche - die Belastungsgrenzen werden konstant gehalten - Sonderfälle der Lebensdauerlinien. Sie werden den realitätsgetreueren Lebensdauerlinien aufgrund von übersichtlicheren Zusammenhängen bevorzugt. Die Lage und Form der Wöhler- bzw. Lebensdauerlinien werden durch mehrere Einflüsse wie Lastfolge (konstante oder variable Amplitude, Spannungsverhältnis), Werkstoff (chemische Zusammensetzung), Fertigung (Oberflächenrauigkeit, Einschlüsse, Poren, Eigenspannungen), Geometrie (Probengröße, Probenform), Versagensform (Anriss, totaler Bruch) und Umgebung (Temperatur, Korrosionsmedien) deutlich geprägt.

In [9] wird die Wöhlerlinie kurz als Funktion von Werkstoff, Kerbart und -form, Oberfläche und Größe beschrieben.

### 1.1.1 Versuchsdurchführung

Vorweg ist zu erwähnen, dass die zur Wöhlerlinien-Ermittlung nötigen Versuche spannungsgesteuert oder weggesteuert gefahren werden können, das heißt, es werden entweder die Spannungsausschläge oder die Verformungsausschläge konstant gehalten. Diese Arbeit beschränkt sich auf spannungsgesteuerte Versuche.

Zur Ermittlung einer Wöhlerlinie werden in Abhängigkeit der Probenanzahl und vorher festgelegten Versuchsbedingungen mehrere gleichartige Probekörper (8) harmonisch zwischen einer konstanten Unter- und Oberspannung ( $\sigma_u$ ,  $\sigma_o$ ) pulsiert, bis sie nach N Lastspielen entweder plötzlich zu Bruch gehen oder bis zu einer definierten Grenz-Schwingspielzahl keinen Bruch erleiden bzw. „unendlich oft“ belastbar sind.

Ergebnisabhängig (Wechselfestigkeit (8), Schwellfestigkeit (8),...) wird entweder die Mittelspannung  $\sigma_m$  oder die Unterspannung  $\sigma_u$  für alle Proben einer Wöhlerreihe konstant gehalten, während die Spannungsamplitude  $\sigma_a$  bzw. die Oberspannung  $\sigma_o$  von Probe zu Probe so variiert werden, bis die größte Beanspruchung gefunden wird, die „unendlich oft“ (bzw. bis zur endlichen Grenz-Schwingspielzahl) ohne Bruch ertragen wird.

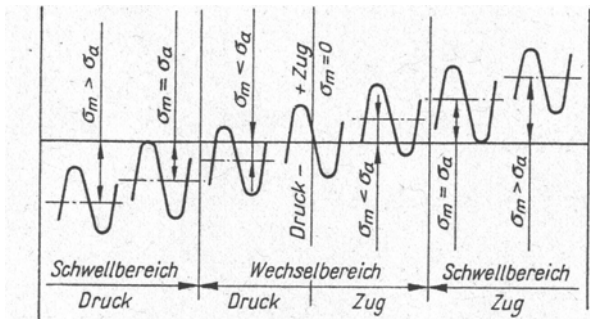
„Die Beanspruchung wird so abgestuft, dass zunächst mindestens eine Probe bei hoher Schwingspielzahl bricht und eine weitere mindestens bis zur Grenz-Schwingspielzahl durchläuft. Diese „Durchläufer“ müssen bei erneuter Prüfung mindestens 60% über der Dauerfestigkeit beansprucht werden; das so gewonnene Ergebnis ist nur als Anhalt brauchbar“ ([2], 4).

Zur Probenzahl wird in [13] folgendes empfohlen:

„Für die Ermittlung der Wöhlerlinie eines Werkstoffes, über den keine Erfahrungen vorliegen, werden in der Regel für den Bereich der Zeitfestigkeit etwa 20 Proben auf zwei bis drei Horizonten verteilt und der Bereich der Dauerfestigkeit im Treppenstufenverfahren mit weiteren 15 bis 25 Proben belegt. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass der Verlauf der Wöhlerlinie statistisch abgesichert ist“ (9).

Das Treppenstufen-Verfahren wird in Kapitel 1.1.1.1 beschrieben.

Im der nachfolgenden Graphik sind die einzelnen Beanspruchungsbereiche zu sehen:



**Bild 1-1:** Beanspruchungsbereiche; aus [9]

Die werkstoffabhängigen Lastspielzahlen  $N$  und die Grenz-Schwingspielzahl werden für die Baustoffe Stahl und Keramik in den nachfolgenden Kapiteln genannt. Gleiches gilt für die Anzahl der verwendeten Proben pro Spannungshorizont, die in den Wöhlerlinien-Diagrammen genauer zu entnehmen sind. Der Begriff Grenz-Schwingspielzahl wird im Kapitel 1.1.3 ausführlich beschrieben.

#### 1.1.1.1 Treppenstufen-Verfahren (Staircase-Verfahren)

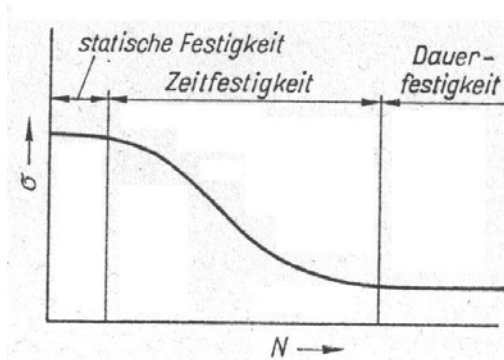
Dieses Verfahren dient dazu den Dauerfestigkeitsbereich auszumachen. Vorteil dieses Verfahrens ist der Verbrauch einer geringeren Probenzahl.

Zunächst wird eine Probe mit einer Spannungsamplitude beansprucht und in Abhängigkeit ihres Verhaltens (Bruch oder Durchläufer) bei der nächsten Probe die Amplitude auf die nächst niedrigere oder nächst höhere Spannungsstufe verändert.

In Tabelle 7 im Anhang ist dieses Verfahren beispielhaft an einer Probe aus Stahl HSB 77V für das Spannungsverhältnis  $\kappa = \sigma_u / \sigma_o = 0,5$  mit einem gewählten Stufenabstand von  $d = 2,5 \text{ N/mm}^2$  ausführlich nachzuvollziehen.

### 1.1.2 Versuchsauswertung

Bei der graphischen Darstellung der Versuche werden die Oberspannung  $\sigma_o$  bzw. die Schwingbreite  $\Delta\sigma$  im arithmetischen oder logarithmischen Maßstab an der Ordinate und die dazugehörig gemessenen Lastspielzahlen  $N$  im logarithmischen Maßstab an der Abszisse aufgetragen. In der nachfolgenden Graphik ist schematisch der Verlauf einer Wöhlerlinie mit den charakteristischen Festigkeitsbereichen dargestellt.



**Bild 1-2:** Festigkeitsbereiche einer Wöhlerlinie; aus [9]

Da die Probekörper jedoch nicht vollkommen identisch sind, verbindet die aufgetragenen Punkte keine eindeutige Linie, sondern es entsteht ein Streufeld, welches in Abbildung 1 im Anhang schematisch dargestellt ist. Die Wöhlerlinie wird ermittelt, indem die Mittelwerte (Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}} = 50\%$ ) des Streubandes verbunden werden; das Streufeld selbst wird durch die Ermittlung der Kurven mit  $P_{\bar{u}} = 10\%$  bzw.  $P_{\bar{u}} = 90\%$  begrenzt, wobei die untere Begrenzungslinie (90% - Kurve) die auf der sicheren Seite liegenden Spannungswerte liefert. Die Ermittlung der einzelnen Kurven erfolgt nach der in Kapitel 1.1.2.1 ausführlich beschriebenen Methode. In Abhängigkeit unterschiedlicher Werkstoffe stellt sich die Wöhlerlinie im doppellogarithmischen Maßstab als kontinuierlich abfallende Gerade dar oder geht ab der Grenz-Schwingspielzahl  $N_D$  in einen konstanten Bereich, den Dauerfestigkeitsbereich, über. Der zu diesem konstanten Bereich zugehörige Spannungswert wird als Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  ( $\Delta\sigma_D$ ) bezeichnet. Sie ist also jene Spannung, die „unendlich oft“ ohne Bruch und ohne unzulässige Verformung ausgehalten werden kann. Die Ermittlung der mittleren Dauerfestigkeit wird in Kapitel 1.1.2.2 beschrieben.

#### 1.1.2.1 Mittelwerte und Streuungen der Zeitfestigkeit

Um im Zeitfestigkeitsbereich für einzelne Spannungshorizonte die Abhängigkeit der Bruchlastspielzahlen  $N$  von den Überlebenswahrscheinlichkeiten angeben zu können, wird folgendermaßen verfahren:

Für einen fest vorgegebenen Spannungshorizont wird die Überlebenswahrscheinlichkeit mit der Formel  $P_{\bar{u}} = m/(n+1) \cdot 100\%$  abgeschätzt. Wobei  $m$  jeweils die Ordnungszahl der nach absteigender Größe von  $N$  geordneten Proben und  $n$  die Gesamtzahl der Versuche auf dem

jeweiligen Spannungshorizont ist, Abbildung 1. Die Ergebnisse werden im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Aufteilung der N-Achse eingetragen und durch die Punkte Geraden gelegt. An diesen Geraden lassen sich folglich die den Überlebenswahrscheinlichkeiten  $P_{\bar{u}} = 90\%$ ,  $50\%$  und  $10\%$  zugeordneten Bruchlastspielzahlen  $N_{90}$ ,  $N_{50}$  und  $N_{10}$  und die Streuungsverhältnisse  $T_N = N_{90}/N_{10}$  ablesen.

### 1.1.2.2 Probit-Verfahren

Für die Ermittlung von Mittelwert und Streuung im Dauerfestigkeitsbereich findet neben dem Treppenstufenverfahren (Kapitel 1.1.1.1) unter anderem das Probit-Verfahren Anwendung. Danach werden zwei oder drei Spannungshorizonte gewählt auf denen Brüche und Durchläufer zu verzeichnen sind, in Abbildung 1 sind es die Spannungshorizonte  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$ . Weiterhin wird eine Lastspielzahl  $N_D$  (Grenz-Schwingspielzahl) vorgegeben. Um die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}}$  zu bestimmen, wird das Verhältnis der Durchläufer zur Gesamtprobenzahl bis zu der vorgegebenen Lastspielzahl  $N_D$  für jeden der zwei oder drei Spannungshorizonte ermittelt und im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen. Durch die erhaltenen Punkte wird eine Gerade gelegt, die die Abhängigkeit der Dauerfestigkeiten von den Überlebenswahrscheinlichkeiten liefert,

Abbildung 2.

Die Dauerfestigkeitswerte sind im allgemeinen auf  $5 \text{ N/mm}^2$  oder  $10 \text{ N/mm}^2$  und unterhalb von  $100 \text{ N/mm}^2$  auf  $1 \text{ N/mm}^2$  gerundet anzugeben.

### 1.1.3 Grenz-Schwingspielzahl (Grenz-Lastspielzahl)

Nach DIN 50 100 setzt die Definition der Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  eine unendliche Schwingspielzahl  $N$  voraus. Da jedoch in der Praxis ein unendlich lange dauernder Versuch nicht durchführbar ist, wird aufgrund der bei vielen Werkstoffen beobachteten asymptotischen Näherung der Wöhlerkurve an die Schwingspielzahl Unendlich die Dauerfestigkeit aus dem Wöhlerschaubild für eine endliche Grenz-Schwingspielzahl entnommen, bei der die Asymptote Erfahrungen zufolge fast erreicht wird. In DIN 50 100 wird die Grenz-Schwingspielzahl für Stahl mit  $10 \cdot 10^6$  Schwingspielen und für Leichtmetalle mit  $100 \cdot 10^6$  Schwingspielen angegeben. Zur Abkürzung der Prüfdauer werden für Stahl auch die Grenz-Schwingspielzahl  $2 \cdot 10^6$  und für Leichtmetalle  $10$  bis  $50 \cdot 10^6$  Schwingspiele angeführt.

In [9] werden die selben Grenz-Schwingspielzahlen für Stahl und Leichtmetalle angegeben, nur wird für Stahl zur Abkürzung der Prüfdauer ein Bereich zwischen  $2$  bis  $5 \cdot 10^6$  Schwingspiele vorgeschlagen.

Zum Zeichen  $\sigma_D$  muss in diesem Fall die betreffende Grenz-Schwingspielzahl als Index angegeben werden, z.B.  $\sigma_{D(10^6)}$ .

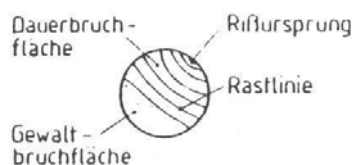


## 2 Der Werkstoff Stahl

### 2.1 Allgemeines Bruchverhalten der Stahl-Probekörper

Das Versagen eines Bauteiles ist nicht ausschließlich als Ergebnis des letzten Lastspieles zu verstehen. Während der gesamten zyklischen Beanspruchung laufen im Werkstoff Vorgänge ab, die in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe nach einer endlichen Lastspielzahl zum Bruch führen.

„Die Bruchflächen der Stahl-Probekörper [Abbildung 17] weisen zwei unterschiedliche Zonen auf, nämlich eine glatte, metallisch blanke und von sogenannten Rast(= Ruhe)linien [Rastlinien treten nicht bei Einstufenversuchen auf] durchzogene Dauerbruchfläche und eine grobe, zerklüftete Restbruchfläche (Gewaltbruchfläche). Die Rastlinien konzentrieren sich um die Ausgangsstelle des Dauerbruchs.



**Bild 2-1:** Bruchbild; aus [11]

Dieses Bruchverhalten erklären sich die Metallurgen wie folgt: Der – global betrachtete - isotrope Werkstoff Stahl ist in Wirklichkeit ein heterogener Werkstoff mit örtlichen Fehlstellen im kristallinen Gitteraufbau (Versetzungen) und an den Korngrenzen (Anhäufungen von Fremdatomen). Der hierdurch bedingte, submikroskopische Eigenspannungszustand überlagert sich mit den äußeren, realen Lastspannungen, die aufgrund konstruktiv bedingter Kerbwirkungen an diesen Fehlstellen z.T. deutlich über den rechnerischen Nennspannungen (aus der Festigkeitsberechnung) liegen können. Dies führt entweder zu plastischen Gleitungen oder zu einer Materialverfestigung mit dem Verlust der duktilen Eigenschaft. In beiden Fällen kommt es bei häufig wiederholter Belastung zu einem submikroskopischen Anriß; die hohen Spannungsspitzen im Kerbgrund (Rißspitze) lösen dann die Werkstoffzerrüttung aus. Ähnliche Auswirkungen haben die Aufstauungen von Versetzungen an den Gleitebenen, die sich häufig entlang der Korngrenzen ausbilden. Ist die Werkstoffzerrüttung genügend weit fortgeschritten (Dauerbruchfläche), kommt es im verbleibenden Restquerschnitt zu einem Gewaltbruch. Im (statischen) Zugversuch dagegen „plastizieren Spannungsspitzen aus dem Werkstoff heraus“ (Spannungsausgleich durch Fließen) und es kommt zu einem frühzeitig erkennbarem Verformungsbruch (entlang der Gleitlinien) mit deutlicher Einschnürung in der Umgebung der Bruchfläche“ ([11], 178).

In Abbildung 3 sind die aus statischen Zugversuchen ermittelten Spannungs-Dehnungs-Verläufe der nachfolgend behandelten Stähle (St 37, hochfeste Stähle) gegenübergestellt.

## 2.2 Experimentelle Untersuchungen an Vollstäben aus St 37

Der Inhalt dieses Kapitels bezieht sich auf die Quelle [5].

### 2.2.1 Werkstoff und Probenabmessungen

Die Versuchsproben wurden aus Si-Al-beruhigtem Stahl St 37-2 gefertigt. Heute ist dieser Stahl nach DIN EN 10025 unter der Bezeichnung S 235 J2G3 zu finden. Die Probenabmessungen betrugen  $h \times b \times l = 14 \times 75 \times 495 \text{ mm}^3$ . Um definierte Sollbruchstellen in den Proben zu erzeugen, wurde der Querschnitt zur Mitte hin verjüngt (Hourglas-Proben), Abbildung 4. Die Formzahl  $K_t$  als Verhältnis von Kerbspannung  $\max \sigma$  zu Nenn- bzw. Durchschnittsspannung  $S_{\text{netto}}$  des abgebildeten Probekörpers beträgt nach [8] nur 1,02 und ist somit vernachlässigbar klein. Die Walzhaut (8) wurde in der Regel nur an den Stabschmalseiten feingeschliffen (8). Die Kanten im Ausrundungsbereich in Stablängsrichtung wurde gefeilt. Der Radius der abgerundeten Kanten betrug ungefähr 0,5 mm.

Der Werkstoff hat folgende statische Festigkeitswerte (8):

$$f_{y,k} = 280 \text{ N/mm}^2, f_{u,k} = 410 \text{ N/mm}^2, A_5 = 31,5\%$$

Das Material wurde nicht normalisiert.

Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 zu finden.

### 2.2.2 Versuchsbeschreibung

Folgende Zug-Druck-Versuche wurden in [5] durchgeführt:

Ermittlung von je vier Wöhlerlinien bei  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$ , davon je eine Einstufen-Wöhlerlinie (Versuche mit nicht vorbelasteten Proben) und je drei Zweistufen-Wöhlerlinien (Versuche mit vorbelasteten Proben).

Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur auf die Einstufen-Versuche eingegangen, die entsprechend der Beschreibung in Kapitel 1.1.1, durchgeführt wurden.

Sämtliche Dauerversuche wurden mit einer 60t-Resonanzprüfmaschine (Prüffrequenz  $\cong 30 \text{ Hz}$ ) durchgeführt. Da sich die Proben abhängig vom Spannungshorizont und dem  $\kappa$ -Wert erwärmten, kühlte diese ein 30cm entfernter Ventilator. Bei einigen Proben wurden dabei die Temperaturen mit einem Temperaturtastgerät bei  $T < 150^\circ\text{C}$  und mit Thermoelementen bei  $T > 150^\circ\text{C}$  gemessen.

Charakteristisch für Proben mit  $\kappa = 0$  waren Fließerscheinungen bei Versuchsbeginn. Daraufhin wurden bei den Einstufen-Versuchen die Proben einmal statisch bis zur Oberspannung belastet. Die Querschnittsverminderung aufgrund des Fließens im Dauerversuch wurde mit dem Messschieber gemessen.

Der Bruchursprung wurde bei allen Proben lokalisiert und der Abstand zur Stabmitte gemessen. Ferner wurde untersucht, ob der Dauerbruch von einer Stabkante oder einer Walzhautkerbe ausging. Wenn die Proben im Dauerversuch nicht versagten (häufig bei  $\kappa = -1$ ), wurden sie anschließend entweder unter statischer Last gebrochen oder auf einem höheren Spannungshorizont bis zum Bruch geprüft. Diese Vorgänge dienten zur Rissuntersuchung, da die Dauerfestigkeiten als anrissfreie Werte zu verstehen sind. Ein positiver Nebeneffekt war die Probenersparnis.

Für jede Wöhlerlinie, sowohl für  $\kappa = -1$  als auch für  $\kappa = 0$ , wurden auf zwei bis sechs Spannungshorizonten je 7 bis 16 Versuche durchgeführt. Folglich ergaben sich Wöhlerlinienscharen.

Zur Bestimmung der den verschiedenen Überlebenswahrscheinlichkeiten  $P_{\bar{u}}$  zugeordneten Spannungen  $\sigma_D$  im Dauerfestigkeitsgebiet wurde in [5] das Probit-Verfahren nach [10] gewählt, welches im Kapitel 1.1.2.2 beschrieben ist. Im Zeitfestigkeitsgebiet wurde die Abhängigkeit der Bruchlastspielzahlen  $N$  von den Überlebenswahrscheinlichkeiten mit Hilfe der Formel  $P_{\bar{u}} = m/(n+1)$  abgeschätzt, siehe Kapitel 1.1.2.1.

Die Ergebnisse für  $\kappa = -1$  sind aus Abbildung 5 und Abbildung 7 und für  $\kappa = 0$  aus Abbildung 6 und Abbildung 7 zu entnehmen.

Um den Einfluss verschiedener Wärmebehandlungen auf die Dauerfestigkeit zu untersuchen, wurden zusätzlich einzelne Versuche für  $\kappa = 0$  und  $\kappa = -1$  mit spannungsarmgeglühten (8) und normalgeglühten (8) Proben durchgeführt. Ferner wurden zur Bestimmung des Walzhautinflusses auch für geschliffene Proben Wöhlerlinienversuche durchgeführt. Außerdem wurden für  $\kappa = 0$  die Versuchsergebnisse sowohl in Abhängigkeit der Nennspannungen  $\sigma = F/A_0$  ( $A_0$  = Fläche des Ausgangsquerschnittes) als auch der effektiven Spannungen  $\sigma = F/A_{Br}$  ( $A_{Br}$  = Bruchquerschnitt) dargestellt.

Die einzelnen Einstufen-Dauerversuche an den St 37-Vollstäben mit Walzhaut sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Die Ergebnisse für  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$  wurden in Tabellenform zusammengestellt.

In diesen Tabellen wurden die Ausgangsquerschnitte ( $A_0$ ), Prüflasten ( $\max F$ ), Prüfspannungen ( $\max \sigma$ ), Bruchlastspielzahlen ( $N$ ), die Lage der Dauerbrüche ( $a$  in cm von der Stabmitte aus) und des Bruchbeginns und die Spannungen bezogen auf den jeweiligen Bruchquerschnitt ( $\sigma_{Br}$ ) aufgelistet. Zusätzlich wurden die statischen Bruchspannungen der angerissenen Proben für  $\kappa = -1$  angegeben und für  $\kappa = 0$  die im Dauerversuch gemessenen wahren Spannungen. Außerdem wurde die Lage aller Proben innerhalb der Bleche, aus denen sie herausgeschnitten

wurden, vermerkt (Stabnummer); dass an einem Brennschnitt der Rand der Probe durchgeglüht ist kann mit bloßem Auge nicht erkannt werden.

In Tabelle 6 werden beispielhaft die Ergebnisse des spannungsarm geglühten St 37-Vollstabes mit Walzhaut für  $\kappa = -1$  aufgelistet.

### 2.2.3 Versuchsergebnisse

Für  $\kappa = -1$  sind die Wöhlerlinien für die Überlebenswahrscheinlichkeiten  $P_{\bar{u}} = 90\%$ ,  $50\%$  und  $10\%$  in Abbildung 8 bis Abbildung 10 zu finden und entsprechende für  $\kappa = 0$  in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Nennspannungen und der effektiven Spannungen präsentiert die Abbildung 13 beispielhaft für St 37 und  $\kappa = 0$ .

#### 2.2.3.1 Die Dauerfestigkeiten des Vollstabes und deren Beeinflussung durch Oberflächenbearbeitungen und Glühbehandlungen

Folgende Feststellungen wurden bezüglich der Beeinflussung durch Oberflächenbearbeitungen und Glühbehandlungen getroffen:

1. Die Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  nichtgeglühter St 37-Vollstäbe mit Walzhaut bei Luftkühlung beträgt für  $N = 2 \cdot 10^6$  und  $P_{\bar{u}} = 50\%$   $\sigma_{D,-1} = 210 \pm 8 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{D,0} = 333 \pm 15 \text{ N/mm}^2$ . Die Streuungen sind dabei auf  $P_{\bar{u}} = 10\%$  und  $90\%$  bezogen.
2. Für Lastspielzahlen  $N > 2 \cdot 10^6$  nimmt die Dauerfestigkeit um etwa 2% bis 4% ab. Bis  $N = 5,5 \cdot 10^6$  sinken die Dauerfestigkeit  $\sigma_{D,-1} = 210 \text{ N/mm}^2$  auf  $203 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{D,0} = 333 \text{ N/mm}^2$  auf  $325 \text{ N/mm}^2$  (Abbildung 8 und Abbildung 11).
3. Bei Vollstäben, die nur in Längsrichtung geschliffen sind, verändert sich die Dauerfestigkeit für  $\kappa = -1$  gegenüber Stäben mit Walzhaut fast nicht ( $\sigma_{D(2 \cdot 10^6)} = 210 \text{ N/mm}^2$ , Abbildung 10).
4. Beim Normalisieren (8) ( $950^\circ\text{C/h}$ ) der Vollstäbe mit Walzhaut sinkt die Dauerfestigkeit auf  $\sigma_{D,-1} = 170 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{D,0} = 260 \text{ N/mm}^2$  (Abbildung 10, Abbildung 12).
5. Beim Spannungsarmglühen (8) ( $650^\circ\text{C/h}$ ) der Vollstäbe mit Walzhaut bewegt sich die Dauerfestigkeit mit  $\sigma_{D,-1} = 185 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{D,0} = 300 \text{ N/mm}^2$  ungefähr in der Mitte zwischen normalisierten und nicht geglühten Proben (Abbildung 9, Abbildung 12).

6. Unabhängig davon, in welcher Reihenfolge die Arbeitsschritte Schleifen in Längsrichtung und Normalisieren durchgeführt werden, wird für  $\kappa = -1$  ca. die gleiche Dauerfestigkeit erlangt. Sie entspricht der Dauerfestigkeit der normalisierten Stäbe mit Walzhaut  $\sigma_D = 170 \text{ N/mm}^2$  (Abbildung 10).

Zusammenfassend geht aus den Versuchsergebnissen hervor, dass die Dauerfestigkeiten des St 37, unabhängig von Glühbehandlungen, unmerklich von seiner Walzhaut beeinflusst werden, sondern von anderen Faktoren (z.B. an der Oberfläche vorhandenen Gefügeständen oder Eigenspannungen). Die Rauheitswerte sind im wesentlichen von der Korngröße und damit näherungsweise von den Zugfestigkeiten der Werkstoffe abhängig. Bei St 37 wurde festgestellt, dass die Walzhaut- und Grenzrauigkeiten gleich groß sind; große Kerben, Riefen (8), Narben usw., sind als Ausnahme für die eigentliche Walzhautstruktur anzusehen. Wird die Grenzrauigkeit von einem Werkstoff überschritten tritt Walzhautkerbwirkung ein.

Ähnlich der Walzhaut haben beim St 37 auch die Stabkanten eine neutrale Wirkung. Die Dauerbrüche der geprüften Vollstäbe gingen in etwa gleicher Zahl von einer der vier Stabkanten wie von Walzhautkerben auf einer der beiden Stabbreitseiten aus.

In [5] werden Erklärungsversuche für unterschiedliche und zudem komplizierte Ursachen des Absinkens der Dauerfestigkeit nach Glühbehandlungen unternommen. Zu diesen Ursachen zählen makroskopische Eigenspannungen sowie Verfestigungen in der Gefügestruktur, die beim Walzen oder bei Oberflächenbearbeitungen besonders an der Werkstoffoberfläche entstehen können. Während das Spannungsarmglühen bei  $650^\circ\text{C}$  überwiegend die Eigenspannungen beseitigt, hebt das Normalisieren, die Gefüge- und Verfestigungsunterschiede auf, welche durch unterschiedliche Verformungen und ungleichmäßige Abkühlung entstehen. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass das 15%-ige Absinken der Dauerfestigkeit der spannungsarm geglühten gegenüber den ungeglühten Proben auf das Beseitigen der herstellungsbedingten (Walzen und Probenfertigung) eingprägten Druckeigenspannungen zurückzuführen ist. Die Erklärung für die noch niedrigeren Werte der normalisierten Stäbe ist entsprechend die Aufhebung der Verfestigung in den Oberflächenschichten. Für die normalisierten Proben wird nach [5] jedoch noch ein zweiter Einfluss in Betracht gezogen.

„Bei Glühbehandlungen insbesondere beim zwängungsfreien Glühen von größeren Proben in höheren Temperaturbereichen treten in der Regel Verformungen auf, die im Dauerversuch bei Zug-Druckbeanspruchung zu  $\sigma_D$ -mindernden Biegespannungen führen. Es ist wahrscheinlich, dass beide Faktoren, Gefügeentfestigung und größere Außermittigkeiten additiv zusammenwirken und für die Festigkeitsdifferenz zwischen spannungsarm geglühten und normalisierten Proben verantwortlich sind“ (13).

Eine Gegenüberstellung von Stabverformungen für geglühte und nicht geglühte Proben, bestätigte, dass die bei nicht geglühten Stäben vorhandene Vorkrümmung (Kragarm  $\max v = 1\text{mm}$ ) durch Spannungsarmglühen kaum verändert, jedoch durch Normalisieren ungefähr auf das Dreifache ( $\max v = 3\text{mm}$ ) vergrößert wird.

Auf die Frage, warum durch das Spannungsarmglühen die Dauerfestigkeit bei  $\kappa = 0$  prozentual genau so hoch beeinträchtigt wird wie bei  $\kappa = -1$ , ist in [5] folgendes zu finden:

„Offen muss hier die Frage bleiben, warum das Spannungsfreiglühen die Dauerfestigkeit bei  $\kappa = 0$  prozentual ebenso stark mindert wie bei  $\kappa = -1$ . Bei  $\kappa = 0$  entfällt wegen der stets überschrittenen Fließgrenze ( $\sigma_D \cong 3300$  und  $3000 \text{ kp/cm}^2 > \sigma_F = 2800 \text{ kp/cm}^2$ ) das Argument der durch Glühen beseitigten Walzeigenspannungen. Es ist möglich, dass Eigenspannungen weniger im Spiele sind aber das Glühen bei  $650^\circ\text{C/h}$  bereits eine oberflächenentfestigende Rekristallisation (8) oder Randentkohlung (8) bewirkt hat. Um das eigentliche Versuchsprogramm nicht einschränken zu müssen, wurde von weiteren Versuchen zur Klärung der noch offenen Fragen abgesehen“ (13).

### 2.2.3.2 Temperaturverhalten der Proben bei Dauerbeanspruchung

Bei allen Dauerbeanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit traten bei den St 37-Vollstäben Erwärmungen auf. Nach [5] ist die Intensität der Wärmeentwicklung von der Spannungshöhe, der Prüffrequenz und von dem eventuell verwendeten Kühlungsverfahren (Luft-, Pressluft-, Ölkühlung usw.) abhängig. Als Ergebnis einer umfangreicheren Temperaturmessung für  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$  ließ sich ein Anwachsen der Temperatur mit der Spannungshöhe registrieren. Der Temperatur-Zeit-Verlauf lässt sich in folgende vier Bereiche einteilen:

- „1. Anlaufbereich ohne Temperaturerhöhung.
2. Bereich mit raschem Temperaturanstieg.
3. Bereich mit konstanter Temperatur. Das Konstantbleiben der Temperatur wird in [3] als Gleichgewichtszustand zwischen Verfestigung und Entfestigung gedeutet.
4. Bereich mit ansteigender Temperatur kurz vor dem Probenbruch“ (14).

In Abbildung 14 sind beispielhaft solche Temperatur-Zeit-Verläufe dargestellt.

Zusammenfassend ließ sich folgendes feststellen:

Für  $\kappa = -1$  wurden Endtemperaturen zwischen  $40$  bis  $60^\circ\text{C}$  ( $\sigma = 220 \text{ N/mm}^2$ ) und  $120^\circ\text{C}$  bis  $250^\circ\text{C}$  ( $\sigma = 230 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma = 250 \text{ N/mm}^2$ ) gemessen.

Für  $\kappa = 0$  betrugen die Höchsttemperaturen minimal  $24^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$  ( $\sigma = 320 \text{ N/mm}^2$ ) und maximal  $75^\circ\text{C}$  bis  $170^\circ\text{C}$  ( $\sigma = 390 \text{ N/mm}^2$ ).

Bei den geglühten Stäben wurde ein kaum unterschiedliches Temperaturverhalten gegenüber den ungeglühten Proben festgestellt, es verschob sich lediglich zu etwas niedrigeren Spannungen hin. Weiterhin wurden bei normalisierten Proben unter  $\sigma_0 = \pm 180 \text{ N/mm}^2$  im Gegensatz zu ungeglühten Proben schon geringe Temperaturerhöhungen gemessen.

Wurden die Proben nicht gekühlt, erhöhten sich lediglich die Temperaturen ohne das qualitative Temperatur-Zeit-Verhalten zu beeinflussen.

### 2.2.3.3 Bruchlage und Bruchfläche

Alle Dauerbrüche traten, wie erwartet, in der Nähe des kleinsten Querschnittes  $A_0$  auf und die Bruchhäufigkeit nahm mit zunehmender Entfernung von  $A_0$  ab. Folglich bestätigt dieses Ergebnis den Bezug aller Spannungen auf den kleinsten Querschnitt  $A_0$ .

#### 2.2.3.4 Streuwerte

Die Lastspielzahlstreuungen  $T_N = N_{90}/N_{10}$  lagen bei  $\kappa = -1$  zwischen  $T_N = 1:2,6$  und  $1:2,9$  und bei  $\kappa = 0$  zwischen  $T_N = 1:2,5$  und  $1:4,6$ .

Die Streubreite  $\pm\Delta\sigma$  der Zeit- und Dauerfestigkeit (untere Grenze  $P_{\bar{u}} = 90\%$ , obere Grenze  $P_{\bar{u}} = 10\%$ ) lag bei  $\kappa = -1$  zwischen  $\Delta\sigma = 6$  und  $9 \text{ N/mm}^2$  und bei  $\kappa = 0$  zwischen  $\Delta\sigma = 6$  und  $15 \text{ N/mm}^2$ .

### 2.3 Experimentelle Untersuchungen an Vollstäben aus hochfesten Baustählen

Der Inhalt dieses Kapitels ist der Veröffentlichung [6] entnommen.

#### 2.3.1 Werkstoff und Probenabmessungen

Geprüft wurden hochfeste schweißbare Feinkornbaustähle der Güte HSB 77V, HSB 55C und N-A-XTRA 70. Die chemischen Zusammensetzungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Die Werkstoffe hatten folgende statische Festigkeiten:

HSB 77V:  $f_{y,k} \cong 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{u,k} \cong 850 \text{ N/mm}^2$

HSB 55C:  $f_{y,k} \cong 530 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{u,k} \cong 640 \text{ N/mm}^2$

N-A-XTRA 70:  $f_{y,k} \cong 750 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{u,k} \cong 820 \text{ N/mm}^2$

Nach heutigen Bezeichnungen sind diese Stähle nicht mehr vorzufinden. Nach DIN EN 10 113 würden die Werkstoffe HSB 77V und HSB 55C unter die Bezeichnungen S 690 und S 460 fallen. Der Werkstoff N-A-XTRA 70 entspräche nach DIN EN 10 137 dem S 690.

Um eine Fließgrenze von  $f_{y,k} \geq 700 \text{ N/mm}^2$  zu erhalten, mussten die Stähle HSB 77V und N-A-XTRA 70 wasservergütet (8) werden, während die Fließgrenze  $f_{y,k} \geq 460 \text{ N/mm}^2$  beim HSB 55C allein durch dessen Legierungsbestandteile gegeben war. Bei Blechdicken von  $t < 20 \text{ mm}$  war jedoch bei letzterem Werkstoff nach dem Normalisieren ein Anlassen (8) ( $600^\circ\text{C}/2\text{h}$ ) notwendig, um die durch die höhere Abkühlungsgeschwindigkeit festigkeitsmindernden Gefügeumwandlungen rückgängig zu machen.

Die Abmessungen der HSB 77V- und HSB 55C-Versuchsproben betrugen  $l \times b \times h = 485 \times 75 \times 14 \text{ mm}^3$ . Die Probenlängsachse lag in Walzrichtung. Es wurden Hourglas-Proben verwendet mit einer Querschnittsverjüngung zu  $b \times h = 40 \times 14 \text{ mm}^2$  deren Kerbwirkung aufgrund der geringen Formzahl  $K_t = (\max \sigma)/S_{\text{netto}} = 1,02$  [8] vernachlässigt wurde. Im verjüngten Bereich der Proben wurden die Schmalseiten fein geschlichtet und die Kanten mit einem Radius  $r \cong 1,0 \text{ mm}$  abgerundet. Die Oberflächen der Breitseiten wurden nicht bearbeitet (Walzzunder (8), -narben und -riefen (8) wurden belassen), (Abbildung 15).

Für Vergleichsversuche wurden einige Proben poliert. Der Poliervorgang bestand aus Nassschleifen (8) und anschließendes Längspolieren der Walzhaut mit Schmirgelleinen (8) (Körnung 180).

Die Abmessungen der N-A-XTRA 70-Probenformen und der polierten HSB 77V-Rundstäbe für Ergänzungsversuche sind Abbildung 16 und Abbildung 17 zu entnehmen.

### 2.3.2 Versuchsbeschreibung

Im Rahmen dieser Vertieferarbeit werden folgende Versuche aus [6] betrachtet:

1. Zeit- und Dauerfestigkeitsversuche an Vollstäben aus HSB 77V und HSB 55C mit Walzhautoberfläche. Es wurden je vier Wöhlerlinien im Bereich  $N > 10^5$  für die Spannungsverhältnisse  $\kappa = +1/2$ ,  $\kappa = 0$ ,  $\kappa = -1$  und  $\kappa_d = -1/3$  ( $= -3$ ) ermittelt.
2. Ergänzungsversuche bei  $\kappa = 0$  und  $\kappa = -1$  sowohl mit polierten Vollstäben aus HSB 77V und HSB 55C als auch mit polierten HSB 77V-Rundstäben.
3. Dauerfestigkeitsversuche an Vollstäben aus N-A-XTRA 70 mit Walzhautoberfläche bei  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$ .

Bis auf die Rundproben (10t-Resonanzprüfmaschine,  $f \cong 156$  Hz), wurden die Dauerversuche mit einer 60t-Resonanzprüfmaschine ( $f \cong 30$  Hz) durchgeführt. Da sich die Proben im Zeitfestigkeitsbereich erwärmten, wurden sie während der Dauerversuche mit einem Ventilator gekühlt und ihre Temperatur wurde gemessen.

Als Grenz-Schwingungszahl wurde  $N_D = 2,2 \cdot 10^6$  festgelegt.

Die Beobachtungen wurden wie bei den Stählen St 37 zusammengestellt.

Der Bruchursprung wurde bei allen Proben lokalisiert und der Abstand zur Stabmitte gemessen. Es wurde untersucht, ob der Dauerbruch von einer Stabkante oder einer Walzhautkerbe ausging. Versagten die Proben im Dauerversuch bei  $N_D \geq 2,2 \cdot 10^6$  nicht, wurden sie anschließend auf einem Spannungshorizont im Zeitfestigkeitsgebiet zur Rissuntersuchung bis zum Bruch beansprucht.

Für jede Wöhlerlinie wurden im Zeitfestigkeitsbereich für 2 bis 3 Spannungshorizonte je 6 bis 9 Proben und für die Dauerfestigkeit je 14 bis 20 Proben geprüft.

Die Versuchsauswertung erfolgte wie in Kapitel 1.1.2 beschrieben.



Die Mittelwert- und Streuungsermittlung im Zeitfestigkeitsgebiet der Wöhlerlinien wurde, wie in Kapitel 1.1.2.1 beschrieben, abgeschätzt.

Die Mittelwerte und Streuungen der Dauerfestigkeiten  $\sigma_D$  wurden mit dem Treppenstufen-Verfahren (Staircase-Verfahren) ermittelt, Kapitel 1.1.1.1. In Tabelle 7 ist beispielhaft für HSB 77V und  $\kappa = +0,5$  die Bestimmung der Zeitfestigkeit bei  $2,2 \cdot 10^6$  Lastspielen nach dem Treppenstufen-Verfahren dargestellt. Aufgrund mangelnder Probenanzahl konnten in einigen Fällen nur mittlere  $\sigma_D$ -Werte durch Einzelversuche bestimmt werden.

In Abbildung 18 bis Abbildung 20 sind die Überlebenswahrscheinlichkeiten über die Bruchlastspielzahlen aufgetragen.

Die Ergebnisse der Versuche mit den Vollstäben HSB 77V, HSB 55C und N-A-XTRA 70, mit und ohne Walzhaut, wurden ebenfalls wie bei den Stählen St 37 in Tabellen zusammengestellt. Beispielhaft werden in Tabelle 8 auszugsweise Ergebnisse des Vollstabes mit Walzhaut aus HSB 77V für  $\kappa = 0$  aufgelistet.

### 2.3.3 Versuchsergebnisse

Die Wöhlerlinien für die Überlebenswahrscheinlichkeiten  $P_{\bar{u}} = 90\%$ ,  $50\%$  und  $10\%$  sind in Abbildung 21 bis Abbildung 28 aufgezeichnet.

#### 2.3.3.1 Mittelwerte der Dauerfestigkeiten

Nachfolgende Tabelle 2-1 enthält für die Stähle HSB 77, HSB 55C eine Übersicht über die ermittelten Mittelwerte  $\sigma_{D,0,50}$ , Streuungen  $T_{\sigma_D} = \sigma_{D,90}/\sigma_{D,10}$ , Fließgrenzen  $f_{y,k}$  und Zugfestigkeiten  $f_{u,k}$ .

**Tabelle 2-1:** Dauerfestigkeiten und Streuungen der hochfesten Baustähle; aus [6]

|   | HSB 77V                |        |        |      |                      |     |                       |        | HSB 55C                |        |        |        |                      |     |
|---|------------------------|--------|--------|------|----------------------|-----|-----------------------|--------|------------------------|--------|--------|--------|----------------------|-----|
|   | Vollstäbe mit Walzhaut |        |        |      | Vollstäbe<br>Poliert |     | Rundproben<br>Poliert |        | Vollstäbe mit Walzhaut |        |        |        | Vollstäbe<br>poliert |     |
| $\kappa$                                  | 1/2                    | 0      | -1     | 1/3  | 0                    | -1  | 0                     | -1     | -1/2                   | 0      | -1     | -1/3   | 0                    | 1   |
| $\sigma_{D,0,50}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 687                    | 401*   | 256*   | -410 | 720                  | 440 | 818                   | 508    | 504                    | 347    | 241    | -398   | 490                  | 335 |
| $T_{\sigma_D}$                            | 1:1,20                 | 1:1,08 | 1:1,53 | ---  | ---                  | --- | 1:1,09                | 1:1,28 | 1:1,11                 | 1:1,50 | 1:1,33 | 1:1,27 | ---                  | --- |
| $f_{y,k}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ]         | 796 [749*]             |        |        |      |                      |     |                       |        | 528                    |        |        |        |                      |     |
| $f_{u,k}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ]         | 851 [818*]             |        |        |      |                      |     |                       |        | 638                    |        |        |        |                      |     |

\* für N-A-XTRA70

Bezüglich der Dauerfestigkeitsmittelwerte  $\sigma_{D,50}$ , die in Abbildung 29 in Abhängigkeit von der Fließgrenzen  $f_{y,k}$ , der Zugfestigkeiten  $f_{u,k}$  und dem Spannungsverhältnis  $\kappa$  aufgetragen sind, wurden in [6] folgende Beziehungen festgestellt:

1. Bei den polierten Vollstäben ist folgende Proportionalität zwischen der Dauerwechselfestigkeitswerten  $\sigma_{D,-1}$  und  $\sigma_{D,0}$  und der statischen Zugfestigkeit  $f_{u,k}$  festgestellt worden (siehe Abbildung 30:  $\sigma_{D,-1}$  bzw.  $\sigma_{D,0}$ -Werte für Vollstäbe mit und ohne Walzhaut über  $f_{u,k}$ ):

$$\sigma_{D,-1} \cong 0,5 \cdot f_{u,k} \quad f_{u,k} < 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{D,0} \cong 0,8 \cdot f_{u,k} \quad f_{u,k} < 1000 \text{ N/mm}^2$$

2. Bei den Vollstäben mit Walzhaut gilt die unter 1. angegebene Beziehung nur bis zu einer Zugfestigkeit von  $f_{u,k} < 370 \text{ N/mm}^2$ . Ab  $f_{u,k} > 370 \text{ N/mm}^2$  ist folgende Beziehung zwischen Dauerwechselfestigkeitswerten  $\sigma_{D,-1}$  und  $\sigma_{D,0}$  und der statischen Zugfestigkeit  $f_{u,k}$  zu vermerken:

$$\sigma_{D,-1} \cong 0,14 \cdot f_{u,k} + 135 \text{ N/mm}^2 \quad f_{u,k} < 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{D,0} \cong 0,22 \cdot f_{u,k} + 211 \text{ N/mm}^2 \quad f_{u,k} < 1000 \text{ N/mm}^2$$

Als Grund für diese wesentlich schwächere Zunahme von  $\sigma_{D,-1}$  ab  $f_{u,k} > 370 \text{ N/mm}^2$  wird die mit wachsender Zugfestigkeit größer werdende Kerbempfindlichkeit der Stähle angegeben. Jedoch wird die Zunahme von  $\sigma_D$  mit  $f_{u,k}$  größer je höher das Spannungsverhältnis  $\kappa$  ist.

3. Zwischen den Dauerfestigkeiten  $\sigma_D$  und den Fließgrenzen  $f_{y,k}$  bestehen entsprechende Beziehungen wie unter den Punkten 1. und 2.. Für polierte Vollstäbe sind in [6] folgende Beziehungen aufgestellt worden:

$$\sigma_{D,-1} \cong 0,44 \cdot f_{y,k} + 90 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{D,0} \cong 0,71 \cdot f_{y,k} + 144 \text{ N/mm}^2$$

Zwischen den Funktionen  $\sigma_D = f_1(f_{u,k})$  und  $\sigma_D = f_2(f_{y,k})$  untereinander besteht auch eine Verknüpfung, und zwar ist diese durch folgende nach [6] angegebene Beziehung gegeben:  $f_{u,k} \cong 0,88 \cdot f_{y,k} + 180 \text{ N/mm}^2$  (nach Tabelle 2-1)

### 2.3.3.2 Mittelwerte der Zeitfestigkeiten

In nachfolgender Tabelle 2-2 sind für die Vollstäbe HSB 77V, HSB 55C und zum Vergleich auch für St 37-Vollstäbe [5] die Mittelwerte und Streuungen zusammengestellt.

**Tabelle 2-2:** Mittelwerte und Streuungen der hochfesten Baustähle; aus[6]

| Werkstoff        | $\kappa$ | m    | $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $N_{50}/10^5$ | $T_N = N_{90}/N_{10}$ | $T_\sigma = T_N^{1/m}$ |
|------------------|----------|------|-------------------------------|---------------|-----------------------|------------------------|
| HSB 77V          | +1/2     | 7,3  | 780                           | 2,85          | 1:1,3                 | 1:1,04                 |
|                  | 0        | 3,6  | 550                           | 2,0           | 1:1,9                 | 1:1,20                 |
|                  |          |      | 750                           | 0,6           | 1:2,0                 | 1:1,21                 |
|                  | -1       | 4,4  | 400                           | 1,3           | 1:2,0                 | 1:1,17                 |
|                  |          |      | 530                           | 0,32          | 1:1,8                 | 1:1,15                 |
|                  | -1/3     | 5,0  | -480                          | 6,0           | 1:2,3                 | 1:1,19                 |
|                  |          |      | -660                          | 1,2           | 1:2,7                 | 1:1,22                 |
|                  | HSB 55C  | +1/2 | 5,4                           | 540           | 5,7                   | 1:2,9                  |
| 0                |          | 7,7  | 580                           | 4,0           | 1:2,8                 | 1:1,21                 |
|                  |          |      | 420                           | 2,5           | 1:2,8                 | 1:1,14                 |
| -1               |          | 7,8  | 520                           | 0,44          | 1:5,1                 | 1:1,23                 |
|                  |          |      | 300                           | 1,9           | 1:2,4                 | 1:1,12                 |
|                  |          |      | 330                           | 0,87          | 1:2,7                 | 1:1,13                 |
|                  |          |      | 350                           | 0,36          | 1:3,6                 | 1:1,18                 |
| St 37<br>aus [5] |          | 0    | 23,0                          | 350           | 9,20                  | 1:4,6                  |
|                  | 370      |      |                               | 2,06          | 1:2,2                 | 1:1,03                 |
|                  | 390      |      |                               | 1,40          | 1:6,0                 | 1:1,08                 |
|                  | -1       | 19,0 | 210                           | 20,0          | 1:4,3                 | 1:1,08                 |
|                  |          |      | 230                           | 3,20          | 1:2,9                 | 1:1,06                 |
|                  |          |      | 250                           | 1,42          | 1:2,6                 | 1:1,05                 |
|                  |          |      |                               |               |                       |                        |

Bezüglich der Zeitfestigkeiten und ihrer Streuungen wurden in [6] folgende Feststellungen getroffen:

1. Im Bereich  $10^5 < N \leq N_D$  können die Wöhlerlinien für die Vollstäbe mit Walzhaut und  $\kappa = \text{konstant}$  durch folgende Potenzfunktion beschrieben werden:  

$$N = N_D \cdot [\sigma_D/\sigma]^m$$
2. Mit wachsender Zugfestigkeit  $f_{u,k}$  wird die Grenzlastspielzahl  $N_D$  und der Exponent m kleiner. Folglich wird die Neigung der Wöhlerlinie steiler:  

$$m = 4,0 \cdot (90/[f_{u,k}])^{2,10} \quad ; \quad N_D = 6 \cdot 10^5 \cdot (90/[f_{u,k}])^{2,05} \quad (\text{Abbildung 31})$$

Als Ursache dafür wird in [6] der unmittelbare Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Walzhautkerbwirkung gesehen.
3. Aus der Abbildung 31 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Grenz-Schwingenspielzahl  $N_D$  und der Exponent m näherungsweise unbeeinflusst vom Spannungsverhältnis  $\kappa$  sind.

4. Die Wöhlerlinien unterschiedlicher Überlebenswahrscheinlichkeiten laufen parallel zueinander, das heißt die Bruchlastspielzahl  $N_{50}$  (Spannungshorizont  $\sigma_{50}$ ) beeinflusst die Lastspielstreuung  $T_N$  nicht.

Aus den Vergleichsversuchen mit N-A-XTRA 70-Walzhaut-Vollstäben wurde festgestellt, dass sich die Festigkeiten kaum von denen des Werkstoffes HSB 77V unterscheiden.

### 2.3.3.3 Diskussion der Walzhautkerbwirkung

Die Dauerbrüche gingen zu mehr als 80% aller Proben von einer Walzhautkerbe aus und zu etwa 20% von der Stabkante. Daher wurde in [6] die Schlussfolgerung gezogen, dass die Schwingfestigkeiten der Vollstäbe mit Walzhaut im Wesentlichen durch die Oberflächenstruktur der Stabbreitseiten bestimmt werden.

„In diesem Zusammenhang sind drei Einflußgrößen zu nennen:

1. die Oberflächenrauigkeit,
2. die Werkstofffestigkeit oder Werkstoffstruktur und
3. Oberflächeneigenspannungen.

Der Einfluß der Oberflächenrauigkeit ist rein geometrischer Natur und kann durch die Formzahl  $[K_t]$  der größten Oberflächenkerbe einer Probe erfasst werden. Für eine qualitative Betrachtung ist es ausreichend, die recht komplizierte, räumlich wirkende Oberflächenkerbe im Neuber'schen Sinne als flache Außenkerbe mit hyperbolischem Rand und ebenem Spannungszustand zu idealisieren. Die charakteristischen geometrischen Größen sind dann die Kerbtiefe  $l$  und der Kerbradius  $r$  mit denen sich die Formzahl  $[K_t]$  näherungsweise berechnen lässt:

$$[K_t] = \frac{\max \sigma}{[S_{netto}]} \cong 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{r}}$$

Die Messung der im mikroskopischen Bereich liegenden Größen  $l$  und  $r$  ist schwierig, so daß für  $[K_t]$  keine genauen Zahlenwerte angegeben werden können. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Oberflächenzustände und damit die Formzahlen  $[K_t]$  der Walzhaut-Vollstäbe unterschiedlicher Festigkeit etwa gleich sind. Rauhtiefenmessungen an Walzhautoberflächen von St 37, HSB 55C und HSB 77V (loser Walzzunder entfernt), die einen Überblick über die Größenordnung der Kerbtiefe  $l$  geben können, stützen diese Annahme. Die drei Werkstoffe zeigen etwa die gleiche, aus mehreren Messungen gemittelte maximale Rauhtiefe von  $R_t \cong 30 \mu\text{m}$  für die Walzhautoberfläche(...) und  $R_t \cong 2,0 \mu\text{m}$  für die polierte Oberfläche (...)" (10).

Zur Erklärung der unterschiedlichen  $\beta_{K,D}$ -Werte wird in [6] auf den Begriff der „Mikrostützwirkung“ nach Neuber eingegangen. Dieses Thema reicht jedoch weit über den Inhalt dieser Arbeit hinaus und soll hier nicht behandelt werden.

#### 2.3.3.4 Temperaturänderungen der Proben infolge Dauerbelastung

Durch die Schwingungsbeanspruchung erwärmten sich die Werkstoffe in Abhängigkeit ihrer Spannungsamplitude, Prüffrequenz und Probenkühlung. Bis auf Proben mit  $\kappa = -1$ , die im hohen Zeitfestigkeitsgebiet Temperaturen von  $T = 120^\circ\text{C}$  bis  $150^\circ\text{C}$  erreichten, waren die Temperaturen bei allen Proben niedriger als  $70^\circ\text{C}$ . Folglich wurde in [6] die Schlussfolgerung gezogen, dass nur im Zeitfestigkeitsgebiet bei  $\kappa = -1$  eine geringfügige Beeinflussung der Schwingfestigkeit durch Erwärmung möglich wäre.

Die Lastspielzahl-Temperatur-Kurven unterteilten sich wie bei St 37 in folgende vier Bereiche:

- „1. Anlaufbereich ohne nennenswerte Temperaturerhöhung,
2. Bereich mit relativ raschem Temperaturanstieg,
3. Bereich mit konstanter Temperatur,
4. Bereich mit rasch ansteigender Temperatur kurz vor dem Probenbruch“ ([6], 14).

Siehe Abbildung 14.

#### 2.3.3.5 Bruchlage und Bruchfläche

In [6] wurden alle Spannungen der Zeit- und Dauerfestigkeiten bezogen auf den kleinsten Querschnitt  $A_0$  angegeben, jedoch traten die Brüche mehr oder weniger außerhalb der Stabmitte auf, so dass die wirklichen Bruchspannungen  $\sigma_{Br} = F / A_{Br}$  kleiner oder gleich den Nennspannungen  $\sigma = F / A_0$  waren.

Da die Abweichungen der wirklichen Bruchspannungen von den Nennspannungen so gering waren, wurden sie wie oben schon erwähnt vernachlässigt.

Weiterhin war zu erkennen, dass die Neigung zur Bruchaußermittigkeit bei höherfesten Stählen zunahm; bei Stählen mit Walzhaut stärker als bei polierten Stählen. Die Begründung dafür ist auf die größeren Spannungsstreuungen der höherfesten Stähle zurückzuführen.

#### 2.3.3.6 Streuwerte und Mittelspannungsempfindlichkeit

Die Spannungsstreuung  $1:T_\sigma = \sigma_{10} / \sigma_{90}$  und die Lastspielzahlstreuung  $1:T_N = N_{10} / N_{90}$  der höherfesten Stähle waren größeren Schwankungen unterworfen als die des Stahls St 37.

Vorhandene Beziehungen konnten nur qualitativ ohne Angabe von expliziten Werten beschrieben werden:

Während die Lastspielzahlstreuung mit steigender Zugfestigkeit abnahm (starke Abnahme des Exponenten  $m$  mit  $f_{u,k}$ ), nahm die Spannungsstreuung zu (Abbildung 32). Dieses Verhalten wurde in [6] über die mit der Zugfestigkeit zunehmende Walzhautkerbwirkung erklärt. „[Die] Umkehrung in der Abhängigkeit von  $[f_{u,k}]$  ist bedingt durch die  $[f_{u,k}]$ -Abhängigkeit des Exponenten  $m$ “ ([6], 9).

Aus der Potenzfunktion und der Parallelität der einzelnen Wöhlerlinien (Punkte 1. und 4. des Abschnittes 2.3.3.2) wurde in [6] folgender Zusammenhang zwischen der Lastspielstreuung  $T_N = N_{90}/N_{10}$  und der Spannungsstreuung  $T_\sigma = \sigma_{90}/\sigma_{10}$  hergeleitet:

$$T_\sigma = T_N^{1/m} \quad (\text{Abbildung 33})$$

Einen Zusammenhang zwischen den Lastspielzahlstreuungen  $T_N$  und den Spannungsverhältnissen  $\kappa$  war nicht erkennbar.

Als Ursache für die größeren Schwankungen bei den höherfesten Stählen wurde in [6] die kleine Probenanzahl und eine ungenügende Durchmischung der Proben angegeben.

Die Werkstoffgüte und der Oberflächenzustand zeigten näherungsweise keine Mittelspannungsempfindlichkeit (8)  $M = 2 \cdot \sigma_{D,-1}/\sigma_{D,0} - 1$ :

$$M \cong 0,28$$

Für die Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  in Abhängigkeit von  $\kappa$  und  $M$  wurde folgende Formel aufgestellt:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{D,-1}}{1 - 1/2 \cdot (1 - M) \cdot (1 + \kappa)}$$

## 2.4 Anmerkung zum Einfluss des umgebenden Mediums auf Stahl

„Bekanntlich wächst der Ermüdungsriß von der Spannungskonzentrationsstelle an der Bauteiloberfläche in das Werkstoffinnere. Damit kommt das umgebende Medium mit den Rissoberflächen in Berührung und kann so durch chemische und physikalische Vorgänge den Rissfortschritt beeinflussen.

Abschließend kann gesagt werden, dass durch Erzeugung von Druckeigenspannungen in der Oberfläche der Adsorptionseffekt und der Korrosionseffekt gemildert werden. In geeigneter Weise aufgebrachte Oberflächenüberzüge schützen die Bauteiloberfläche vor dem schädigenden Medium. In beiden Fällen erreicht man eine Erhöhung der Lebensdauer“ ([9], 47).

„Die Auswirkungen des Mediums sind bei niedrigen zyklischen Belastungen ausgeprägter als bei hohen. Zur Erklärung des Umwelteinflusses wird angeführt, dass die während der Zugphase an der Risswurzel neu entstandenen Bruchoberflächen in der darauffolgenden Druckphase unter den Bedingungen des Vakuums wieder teilweise verschweißt werden, während bei ausreichendem Luftdruck die eingepressten Gasmoleküle bzw. Moleküle des umgebenden Mediums das Verschweißen verhindern. Außerdem können in der Rißwurzel adsorbierte Gase zur Herabsetzung der Bindungsenergie der Atome beitragen. Insbesondere soll der Wasserdampf mit den neu entstandenen, nicht oxydierten Rissflächen reagieren, wobei atomarer Wasserstoff eine sprödebrüchige Rißausbreitung auslösen soll“ ([9], 48).

## 3 Der Werkstoff Keramik

### 3.1 Keramische Eigenschaften

In [12] ist unter anderen folgende Definition für die Keramik zu finden: Keramiken sind Werkstoffe, „die dadurch zustande kommen, dass ein Pulver geformt und die Form durch Einwirkung hoher Temperaturen verfestigt wird“ (1).

Fast alle keramischen Produkte haben eine heterogene Struktur. Die Struktur setzt sich aus vielen einheitlichen oder verschiedenen Kristallen zusammen, die oft von Glas umgeben sind, und enthält manchmal noch Poren.

„Keramische Kristalle weisen zwar allgemein ein von der Beanspruchungsrichtung abhängiges elastisches Verhalten auf. Im effektiven Verhalten von polykristallinen Ingenieurskeramiken ist dieser Effekt aber aufgrund der zumeist regellosen Orientierung der Kristallite nicht oder nur schwach ausgeprägt. Eine unter Umständen nicht mehr vernachlässigbare Anisotropie kann sich aber in Verbindung mit der Porosität ergeben, wenn die Poren oder Mikrorisse herstellungsbedingt eine Vorzugsorientierung besitzen“ ([15], 35).

Keramische Werkstoffe haben folgende positive Eigenschaften:

- Hohe Festigkeit bei hohen Temperaturen
- Verschleißwiderstand
- Korrosionsbeständigkeit
- Geringes spezifisches Gewicht
- Geringe Wärmeleitfähigkeit
- Geringe elektrische Leitfähigkeit
- Günstige optische Eigenschaften (Durchsichtigkeit, Leichtleitung)

Der maßgebende Nachteil dieser Werkstoffe ist die hohe Sprödigkeit (8). Ein damit zusammenhängender Nachteil ist die große Festigkeitsstreuung.

In [9] ist folgende Definition des Sprödbrechens zu finden:

„Sprödbrech entsteht im Bereich elastischer Verformung (keine plastische Verformung) und weist körnig-glänzende Bruchflächen auf. Durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Sprödbrechens entstehen glatte Bruchverläufe, die nicht über charakteristische Wachstumslinien, wie z.B. beim Dauerbruch, verfügen.

Infolge der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Sprödbrechens führt die plötzlich freiwerdende Energie in der Konstruktion zur Totalzerstörung“ (50).

Mikrostrukturelle Untersuchungen der Ermüdungsrisssbildung und –ausbreitung sind im Gegensatz zu Stahl kaum vorhanden.

Mechanische Eigenschaften:

Für die mechanische Eigenschaft der Keramiken spielt das Gefüge eine erhebliche Rolle.

In nachfolgender Tabelle 3-1 sind die elastischen Konstanten der in dieser Arbeit erwähnten Keramiken aufgelistet:

**Tabelle 3-1:** elastischen Konstanten von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Si}_3\text{N}_4$

| Werkstoff                     | E [N/mm <sup>2</sup> ] | G [N/mm <sup>2</sup> ] | K [N/mm <sup>2</sup> ] | $\mu$ |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ dicht | 410000                 | 165000                 | 255000                 | 0,23  |
| $\text{Si}_3\text{N}_4$       | 295000                 | 115000                 | 235000                 | 0,29  |

Die Zugfestigkeiten dichter keramischer Werkstoffe liegen ungefähr bei 100 N/mm<sup>2</sup>, jedoch sind diese Werte nicht konstant, sondern hängen stark vom jeweiligen Gefüge ab. Vor allem die Porosität im Gefüge hat einen Einfluss auf die Festigkeit.

## 3.2 Experimentelle Untersuchungen an Vollstäben aus $\text{Al}_2\text{O}_3$ und $\text{Si}_3\text{N}_4$

### 3.2.1 Werkstoffe und Probenabmessungen

Werkstoffe:

Folgende Keramiken wurden in [13] geprüft:

$\text{Al}_2\text{O}_3$ - SG, (konventionell hergestellt)

$\text{Al}_2\text{O}_3$ -TV 1863, (konventionell hergestellt)

$\text{Al}_2\text{O}_3$ -B7 (PVA bzw. PVB) (Neuentwicklungen) und

$\text{Al}_2\text{O}_3$ -9005 sgt (Neuentwicklungen)

Weiterhin wurden stichprobenartig zwei  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken (Neuentwicklungen) untersucht, welche sich in ihren Stoff- und Fertigungsparametern unterschieden. Sie wurden im Wesentlichen zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit und Thermoschockresistenz entwickelt.

Die Proben wurden bei der Robert Bosch GmbH, Stuttgart gefertigt und tragen daher Bosch-interne Bezeichnungen. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramiken TV 1863, B7 und 9005 sgt wurden aus dem Rohstoff XA 1000 SG von Alcoa hergestellt. Das Pulver für die Variante B7 und die  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Proben wurde vom Max-Planck-Institut für Werkstoffwissenschaften, pulvermetallurgisches Laboratorium, Stuttgart, zur Verfügung gestellt.

In Tabelle 3 sind die chemischen Zusammensetzungen der Werkstoffe sowie ihre Pulverherstellung und in Tabelle 9 die Fertigungsbedingungen und die erzielten mittleren Dichten zusammengestellt.



#### Gefüge:

Allen Keramiken ist eine interkristalline Porosität gemeinsam.

Die SG-Keramiken zeigen dabei ein extrem poröses Gefüge, wobei die mit nur 300 bar gepressten Rundproben poröser sind als die mit 600 bar (axial) und 2000 bar (isostatisch) gepressten Flachproben. Der hohe Glasphasenanteil dieser Keramik ist ebenfalls charakteristisch.

Die TV 1863-Keramik hat eine inhomogene Poren- und Korngrößenverteilung.

Bei der B7-Variante ist lediglich gegenüber oben genannten Keramiken das Gefüge verdichtet, jedoch sind Restporosität und inhomogenes Kornwachstum nicht gänzlich zu beseitigen.

Die 9005 sgt-Keramik hat ein porenarmes Gefüge mit geringfügigem Korngrößenwachstum.

Das Gefüge der  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken zeichnet sich durch größere Poren, Porenanhäufungen und Riesenkörner aus, die nahe der Oberfläche festigkeitsbestimmend werden.

Die drucklos gesinterte Probe wurde durch eine Tiefenätzung (Herausätzen der Glasphase und der in ihr enthaltenen Körner) präpariert. „Durch das heißisostatische Pressen wurde jedoch diese Glasphase herauskristallisiert, wobei durch den Verbrauch der Glasphase für die Kristallbildung die Porosität wieder etwas zunahm“ ([13], 5).

#### Probenabmessungen:

Es wurden ungekerbte und gekerbte Proben den Versuchen ausgesetzt, doch wird im Rahmen dieser Arbeit nur auf die Ergebnisse der ungekerbten Proben eingegangen.

Die Hourglas-Rundproben waren 70mm lang mit einem Durchmesser von 18mm an der unverjüngten Stelle und 10mm Durchmesser im mittleren Bereich. Die Formzahl dieser Proben betrug  $K_{tb} = 1,08$ , Abbildung 34. Die Radien wurden nach dem Glühen und die Einspannenden nach dem Sintern geschliffen.

Die Flachprobenabmessungen betrugen  $l \times b \times h = 70 \times 10 \times 10$  bzw.  $7\text{mm}^3$ . An der verjüngten Stelle waren die Proben 5mm breit und somit betrug die Formzahl  $K_{tb} \approx 1,02$ , Abbildung 35. Die Einspannenden wurden nach dem Sintern geschliffen, die übrigen Flächen und Radien blieben jedoch unbearbeitet.

Die Proben wurden durch eine Oberflächenrissprüfung (Farbeindringverfahren) auf Riefen und Abplatzungen untersucht und bei aufspüren solcher Oberflächendefekten ausgesondert.

#### Biegefestigkeiten:

Angaben zu den Biegebruchfestigkeiten von ungekerbten Keramiken lagen nicht vor. Es wurden lediglich Versuche an gekerbten Proben ( $K_{tb} = 1,77$ ) durchgeführt, deren Bruchfestigkeiten zwischen  $340 \text{ N/mm}^2$  und  $470 \text{ N/mm}^2$  lagen, Tabelle 9.

Die höher gepressten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SG haben eine höhere Bruchfestigkeit als die mit 300 bar gepresste Variante.

Die Keramiken B7, 9005 sgt und TV 1863 haben wiederum eine höhere Bruchfestigkeit als die SG-Keramiken, wobei die Keramik  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -9005 sgt aufgrund ihres porenarmen Gefüges sogar höhere Festigkeiten aufweist als die  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Varianten.

„Bei der Siliziumnitrid-Keramik beeinflusst das zusätzliche heißisostatische Pressen gegenüber dem drucklos gesinterten Zustand die Bruchfestigkeit kaum, da Poren nicht vollständig beseitigt wurden“ ([13], 7).

Generell gilt, dass die statistische Aussagekraft bei zunehmender Probenanzahl steigt. Die hier genannten Biegebruchfestigkeiten basieren auf einem verhältnismäßig geringen Probenumfang und sollten daher als tendenzielle Werte verstanden werden.

### 3.2.2 Versuchsbeschreibung

Unter die breite Versuchspalette fielen auch die Schwingfestigkeitsversuche bei Raumtemperatur.

Es wurden 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, die zur Festigkeitsbestimmung von Keramik-Werkstoffen bezüglich des Aufwandes und der Genauigkeit den Vorzug genießen.

Verglichen zum 3-Punkt-Biegeversuch werden in der Regel beim 4-Punkt-Biegeversuch geringere Festigkeiten festgestellt. Der Grund dafür ist, dass der Bruchursprung in der Regel von der Oberfläche ausgeht und beim 4-Punkt-Biegeversuch eine größere Fläche der maximalen Beanspruchung ausgesetzt ist, so dass auch das Auftreten eines größeren Fehlers wahrscheinlicher wird. Um die Festigkeit zu erhöhen, müssten die Proben vorher einem Poliervorgang unterzogen werden.

Für die Rundproben wurde ein 40 kN-Hydraulikzylinder verwendet, während für die Flachproben aufgrund von Genauigkeitsanforderungen im niedrigen Lastbereich ein 7 kN-Hydraulikzylinder eingesetzt wurde.

Die Belastungsfrequenz betrug 20 Hz. Um den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit zu untersuchen wurden einige Proben 2 Hz ausgesetzt. Zur Versuchszeitabkürzung wurde die Frequenz in manchen Fällen auf 30 Hz erhöht. Die Prüfkörper wurden wechselnder ( $\kappa = -1$ ) oder schwellender ( $\kappa = 0$ ) Belastung ausgesetzt.

Als Versagenskriterium wurde der Bruch festgelegt.

Folgende Schwingfestigkeitsversuche wurden mit den unterschiedlichen Keramiken durchgeführt:

Es wurden nur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SG-Rundproben ( $K_{tb} = 1,08$ ) für  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$  geprüft. Die anderen Keramiken wurden in Form von Flachproben ( $K_{tb} = 1,02$ ) nur Wechselbeanspruchungen ausgesetzt ( $\kappa = -1$ ).

Die Schwingfestigkeitsversuche wurden sowohl im Zeit- ( $N < 10^6$ ) als auch im Dauerfestigkeitsbereich ( $N > 10^6$ ) durchgeführt. Als Grenz-Schwingspielzahl wurde  $N_D = 2,5 \cdot 10^6$  festgelegt. Um sich dieser Dauerfestigkeitsgrenze zu nähern, wurden für jede Versuchsreihe Spannungshorizonte gesucht, bei denen Durchläufer zu verzeichnen waren. Brachen die Durchläufer bis  $5 \cdot 10^6$  Schwingspielen nicht, wurden sie ebenfalls anschließend auf einem höheren Spannungshorizont bis zum Bruch belastet, Kapitel 1.1.1.

Die große werkstoffeigene Streuung der Keramiken verlangt zur statistischen Absicherung der Versuchsergebnisse eine hohe Anzahl von Proben, die jedoch in [13] aufgrund des hohen Fertigungsaufwandes und der großen Versuchslaufzeiten bei der Ermittlung der Dauerfestigkeit nicht konsequent eingehalten werden konnte (5 bis 10 Stück je Formzahl, Spannungsverhältnis und Temperatur), so dass auch hier die statistische Aussagekraft als gering betrachtet werden muss.

Die Versuche wurden ausgewertet, indem über eine statistische Sichtung der Einzelergebnisse ein Wöhlerlinienstreuband

$$T_\sigma = 1 : [\sigma_a(P_{\bar{u}} = 10\%) : \sigma_a(P_{\bar{u}} = 90\%)]$$

und eine Wöhlerlinienneigung

$$k = \frac{\Delta \lg N}{\Delta \lg \sigma_a}$$

ermittelt wurden, so dass die Ergebnisse von jeder Versuchsreihe zwischen den Grenzen der Überlebenswahrscheinlichkeiten  $P_{\bar{u}} = 10\%$  und  $P_{\bar{u}} = 90\%$  lagen. Die hochgesetzten Durchläufer wurden wegen der beobachteten Verfestigungen nicht berücksichtigt.

Wie bei Glas gilt auch bei der Keramik, dass das schwächste Glied die Festigkeit bestimmt (Ketten-Prinzip). Folglich wird zur Auswertung von Festigkeitsmessungen die Weibull-Statistik angewendet.

### 3.2.3 Versuchsergebnis

#### 3.2.3.1 Mittelwerte und Streuungen der Dauerfestigkeiten

In Tabelle 10 ist auszugsweise die Zusammenstellung der einzelnen Ergebnisse zu finden. Die Wöhlerlinien für die verschiedenen Keramiken sind in Abbildung 36 bis Abbildung 41 abgebildet.

Auf Abbildung 42 ist zum Vergleich das Wöhlerlinienschaubild eines Flachstabes mit  $K_t = 1,0$  aus gesintertem  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bei Raumtemperatur zu sehen.

Für alle Proben einschließlich des Flachstabes mit  $K_t = 1,0$  wurde einheitlich eine Neigung der Wöhlerlinie von  $k = 85$  und für die Dauerfestigkeitswerte eine Streuung von  $T_\sigma = 1 : 1,40$  bestimmt. „Dieses Streumaß entspricht einem Weibull-Exponenten von  $m = 9,1$ “ ([13], 10).

In Abbildung 43 ist die sich aus allen durchgeführten Versuchen ergebende Wöhlerlinie aufgetragen. Aufgrund dieses extrem flachen Verlaufes lassen sich bereits im Zeitfestigkeitsgebiet sehr hohe Streuungen registrieren, welche bei metallischen Werkstoffen in diesem Ausmaß erst im Dauerfestigkeitsbereich auftreten, so dass keine Streuung der Schwingspielzahlen ermittelt werden konnte.

Da die Durchläufer erneut auf einem höheren Spannungshorizont getestet wurden, konnte in [13] festgestellt werden,

„dass die hochgesetzten Proben in mehreren Fällen eine höhere Festigkeit bzw. längere Lebensdauer aufwiesen als nur auf dem gleichen Horizont untersuchte Proben. Ursache hierfür kann einerseits eine bessere Probenqualität der ersteren, aber auch ein Abbau von Zugeigenspannungen durch Belastung im vorangegangenen dauerfestigkeitsnahen Horizont sein. Da es sich in allen Fällen um nichtmetallische Werkstoffe handelt, kann ein Trainiereffekt zur Erklärung nicht herangezogen werden, aber eventuell der Abbau von Zugeigenspannungen durch thermodynamische Vorgänge in der Glasphase“ (11).

Der extrem flache Verlauf der Wöhlerlinien, für den die Sprödigkeit als Ursache genannt wird, lässt keine Einteilung der Ermüdungsfestigkeit in Zeit- und Dauerfestigkeitsbereiche zu. Für die keramischen Werkstoffe gibt es keine Dauerfestigkeit, wie sie bei metallischen Werkstoffen zu finden ist. Es lässt sich nur eine Art Dauerfestigkeitsgrenze ( $\sigma_{2,5 \cdot 10^6}$ ) feststellen, bei deren Überschreitung, aufgrund der extrem flachen Wöhlerlinien-Neigung mit frühzeitigen Brüchen zu rechnen ist. Folglich sind die Keramik-Werkstoffe für Betriebsbelastungen mit veränderlichen Amplituden, die teilweise diese Grenze überschreiten, ungeeignet. „Liegt jedoch die Betriebsbeanspruchung unterhalb dieser Grenze, so ist mit einem Rissfortschritt bzw. mit Brüchen nicht zu rechnen. In der Bemessungspraxis kann dies durch Festlegung einer zulässigen Spannung geschehen, die sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Streuung für eine geforderte Ausfallswahrscheinlichkeit ergibt“ ([15], 162).

Bezüglich der Zeitabhängigkeit der Versuchsergebnisse ließ sich bei Raumtemperatur kein Unterschied zwischen den mit 20 Hz belasteten Proben und 2 Hz belasteten Proben feststellen.

In der nachfolgenden Tabelle 3-2 sind die Dauerfestigkeiten bei Raumtemperatur gegenübergestellt ( $N_D = 2,5 \cdot 10^6$ ):

**Tabelle 3-2:** Dauerfestigkeiten der Keramiken aus 4-Punkt-Biegeversuchen ( $N_D = 2,5 \cdot 10^6$ )

| Material                       | Rundproben $K_{tb} = 1,08$   | Flachprobe $K_{tb} = 1,02$                  |
|--------------------------------|--|---|
| $Al_2O_3$ -SG                  | $\sigma_{D,-1} = 193 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma_{D,0} = 90 \text{ N/mm}^2$ | $\sigma_{D,-1} = 196 \text{ N/mm}^2$<br>--- |
| $Al_2O_3$ -TV 1863             | ---  | $\sigma_{D,-1} = 200 \text{ N/mm}^2$        |
| $Al_2O_3$ -B7 (PVA)            | ---  | $\sigma_{D,-1} = 196 \text{ N/mm}^2$        |
| $Al_2O_3$ -9005 sgt            | ---  | $\sigma_{D,-1} = 174 \text{ N/mm}^2$        |
| $Si_3N_4$ (drucklos gesintert) | ---  | $\sigma_{D,-1} = 222 \text{ N/mm}^2$        |
| $Si_3N_4$ (HIP)                | ---  | $\sigma_{D,-1} = 222 \text{ N/mm}^2$        |

Trotz ungleicher Stoffparameter, Fertigungsverfahren und Bruchfestigkeiten wurden in [13] unter Berücksichtigung der leicht unterschiedlichen Formzahlen, werkstoffeigenen Streuungen und Auswertegenauigkeiten die Dauerfestigkeiten der einzelnen Werkstoffe als gleichwertig betrachtet. Jedoch lässt sich aus Abbildung 42 durchaus schließen, dass die  $Si_3N_4$ -Keramiken bei geeigneten Fertigungsbedingungen höhere Schwingfestigkeiten erzielen können. Dass bei den beiden  $Si_3N_4$ -Varianten keine Unterschiede auftraten wird darauf zurückgeführt, dass beim heißisostatischen Pressen die Porosität nicht vollständig beseitigt werden konnte.

Schädliche Kanteneinflüsse kamen bei den Brüchen nicht zum Vorschein. Die Anrisse gingen in der Regel von der maximal belasteten Stelle (Kerbmitte) aus.

Als Ursache für das gleichwertige Verhalten der Keramik-Werkstoffe unter zyklischer Beanspruchung im Gegensatz zu den statischen Biegebruchfestigkeiten wurden in [13] die jeweils unterschiedlichen Versagensmechanismen angegeben.

### 3.2.3.2 Vergleich der Dauerfestigkeiten und Bruchfestigkeiten

Zwischen der Kerb-Biegebruchfestigkeit und der Dauerfestigkeit kam folgendes Verhältnis zustande:  $\sigma_D / R_b \approx 0,35$  bis  $0,60$ . „[Abbildung 44] zeigt, dass bei den untersuchten Werkstoffvarianten eine Steigerung der Biegebruchfestigkeit unter Raumtemperatur durch werkstofftechnische Maßnahmen die Dauerfestigkeit kaum beeinflusst“ ([13], 12).

### 3.2.3.3 Bruchverhalten der Keramik-Probekörper

Alle überprüften Brüche gingen unabhängig der Versuchsvariationen erwartungsgemäß von der höchstbeanspruchten Stelle aus und verliefen transkristallin. Auslöser der Brüche waren in der Regel oberflächennahe Poren, Gefügauflockerungen oder Riesenkörner, Abbildung 45. Diese Fehler waren zwischen 40µm und 130µm tief und zwischen 90µm und 230µm breit. Nur bei der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9005 sgt-Keramik (geringe Porosität) konnten diese Auslöser nicht ausgemacht werden.

### 3.2.3.4 Mittelspannungsempfindlichkeit

Es wurde stellvertretend für alle Keramiken nur die Mittelspannungsempfindlichkeit von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SG mit  $K_t = 1,08$  ermittelt, welche  $M = 1,14$  beträgt.

Auf Zugmittelspannungen reagieren die keramischen Werkstoffe mit einer starken Abnahme der Ermüdungsfestigkeit. Druckmittelspannungen führen jedoch zu einer Steigerung der ertragbaren Spannungsamplitude.

## 3.3 Ergebnisse weiterer Keramik-Werkstoffe

### 3.3.1 Reaktionsgesintertes Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (RBSN)

In [17] wurde reaktionsgesintertes Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (RBSN) untersucht.

Bezüglich der chemischen Zusammensetzung und des Gefügaufbaus können keine weiteren Angaben gemacht werden, obwohl diese Eigenschaften für die Festigkeit von entscheidender Bedeutung sind, wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt.

Die Abmessungen der Biegeproben betrugen 3,5 x 4,5 x 45mm<sup>3</sup>. Der Quelle konnte nicht entnommen werden, ob es sich um 3- oder 4-Punkt-Biege-Prüfungen handelte.

Es wurden Biegeschwellversuche mit variabler Oberspannung  $\sigma_o$  und einer konstanten Unterspannung  $\sigma_u = 60 \text{ N/mm}^2$  bis zum Bruch oder zur Grenzlasterlastspielzahl  $N_D = 10^5$  durchgeführt. Die Frequenz betrug  $f = 1 \text{ Hz}$ . In Abbildung 46 ist beispielhaft die Ermittlung einer Wöhlerkurve zu sehen. Im oberen Bereich der Belastungsstufen ( $\sigma_o = 240 \text{ N/mm}^2$  bis  $\sigma_o = 260 \text{ N/mm}^2$ ) versagten alle Proben bei einer Bruchlastspielzahl  $N < N_D = 10^5$ . Auf der Belastungsstufe  $\sigma_o = 200 \text{ N/mm}^2$  waren 13 von 20 Proben Durchläufer. Wie auch die vorangegangenen Proben, zeigen die RBSN-Keramiken eine Ermüdungstendenz mit großen Streuungen.

Um bestätigen zu können, dass die durchgeführten Versuche einer spezifisch-zyklischen Ermüdung unterworfen waren und nicht rein statischen Ermüdungsmechanismen folgten, wurden unter Zugrundelegung eines statischen Risswachstumsmechanismus die Bruchlastspielzahlen für diese Proben vorausberechnet. Die vorausberechneten Bruchlastspielzahlen lagen

um eine Größenordnung über den experimentell ermittelten Werten, so dass von einem unterschiedlichen Risswachstumsmechanismus bei statischer und zyklischer Beanspruchung ausgegangen werden konnte. In den untersuchten Keramiken trat unter zyklischer Beanspruchung bereits bei kleineren Spannungen als im statischen Belastungsfall Risswachstum auf.

In [17] wird außerdem folgendes zum Risswachstum in spröden Werkstoffen geschrieben:

„Offensichtlich sind in allen diesen Gefügen, die unterschiedliche Porosität und Festigkeit sowie verschiedenen Verstärkungseffekte und Gefügeparameter aufweisen, zyklische Ermüdungsmechanismen wirksam. Dagegen sind in Glas und Glaskeramik keine zyklisch bedingten Ermüdungsprozesse nachzuweisen, was durch Ergebnisse in der Literatur bestätigt wird und auch mit der hier beschriebenen Technik (Potentialmethode) festgestellt wurde. Der homogene, hochspröde Glaswerkstoff verhält sich unter schwingender Belastung ähnlich wie unter statischer Last. Die in spröden Werkstoffen beobachteten zyklischen Ermüdungseffekte finden ihre Ursache also vermutlich in den zahlreichen Gefügefehlern der realen, defektreichen, eigenspannungsbehafteten, polykristallinen Werkstoffe, die sich gegen den theoretischen Idealzustand eines homogenen isotropen kontinuumsähnlichen spröden Körper abgrenzen, für den bisher kein zyklisch bedingter Ermüdungsmechanismus nachgewiesen wurde“ (120).

Im Gegensatz zu den metallischen Werkstoffen wurde bezüglich der Rissbildung bei Keramiken festgestellt, dass bei diesen durchaus auch im Druck-Schwellbereich aufgrund von Gefügefehlern eine Rissbildung auftreten kann. Auch der homogene isotrope Modellwerkstoff Glas, weist sogar unter extrem hohem hydrostatischen Druck keine Schädigung auf.

### 3.3.2 Aluminiumoxid-Sinterkörper (BIOLOX<sup>®</sup>)

In [18] wurden Prüfkörper aus BIOLOX<sup>®</sup> geprüft. Bei diesem Werkstoff handelt es sich um eine reine, dichte und feinkörnige Aluminiumoxidkeramik mit folgender Zusammensetzung:

99,7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 0,25%  $\text{MgO}$

Dichte: 3,94 g/cm<sup>3</sup>

mittlerer Korndurchmesser: 4  $\mu\text{m}$

Zur Bestimmung der dynamischen Dauerfestigkeit wurden sowohl Zug-Schwell- als auch Druck-Schwellversuche mit einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Der Versuchsaufbau entspricht vermutlich einem 3-Punkt-Biegeversuch. Nähere Angaben zur Prüfmaschine wurden nicht gemacht.

Folgende Dauerfestigkeiten wurden für Aluminiumoxidkeramik bei einer Grenzschwingenspielzahl  $N_D = 4 \cdot 10^6$  bestimmt (20°C und 65% relative Luftfeuchtigkeit):

Die Zugschwellfestigkeit betrug  $\sigma_{DZ} = 160 \text{ N/mm}^2 \pm 160 \text{ N/mm}^2$  und die Druckschwellfestigkeit  $\sigma_{DD} = 800 \text{ N/mm}^2 \pm 800 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.3.3 Dichtes polykristallines Aluminium

In [19] wurde dichtes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  behandelt:

mittlerer Korndurchmesser:  $25\mu\text{m}$

Dichte:  $\rho = 3,85\text{g/cm}^3$

Unreinheiten: 0,75% Si, 0,5% Mg

geschätzte Porosität: 1% bis 2%

Die Probenform war ein 63,5mm langer Stab mit kreisförmigem Querschnitt, dessen Durchmesser 6,223mm betrug.

Versuchsbeschreibung:

Es wurden 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Um Reibungseffekte zu vermeiden, wurden die Proben mit Nadellagerungen unterstützt.

Die Proben wurden einer Schwellbeanspruchung unterzogen mit einer Frequenz von 0,1 Hz bis 40 Hz. Die maximale Oberspannung betrug  $\sigma_o = 33300\text{psi} \cong 229,6\text{ N/mm}^2$ . Die Kraftmessdosen wurden an ein Oszilloskop angeschlossen. Die Versuche wurden unter Raumtemperatur ( $\cong 25^\circ\text{C}$ ) und einer relativen Luftfeuchte von 40% bis 50% durchgeführt.

Folgende Versuchsergebnisse konnten der Literatur entnommen werden:

Bei 4 Hz wurde nahezu eine Amplitudenunabhängigkeit der mittleren Biegebruchfestigkeit festgestellt. Bei einer Amplitude von  $\sigma_a = 1550\text{psi} \cong 10,7\text{ N/mm}^2$  konnte ebenfalls keine signifikante Frequenzabhängigkeit festgestellt werden, während bei den Amplituden  $\sigma_a = 3000\text{psi} \cong 20,7\text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_a = 6000\text{psi} \cong 41,4\text{ N/mm}^2$  dies der Fall war.

Bei hohen Frequenzen und Amplituden macht sich ein zunehmender zyklischer Ermüdungsprozess bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bemerkbar. Je höher die Frequenz steigt desto größer wird die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Schwingspielzahl.

Als Hauptgrund für das zyklische Versagen werden Leerstellen an der Rissspitze genannt.

### 3.3.4 Zusammenfassung bisheriger Erkenntnisse

Bezüglich weiterer Keramik-Werkstoffe wurde in [17] eine Übersicht über bisherige Erkenntnisse aus anderen Quellen gegeben:

Nicht bei allen keramischen Werkstoffen konnte ein zyklischer Versagensmechanismus festgestellt werden. Dazu zählen Porzellan, bei dem die Ermüdungserscheinungen auf rein statische Effekte zurückgeführt wurden. Ebenso bei den SiSiC-Proben (reaktionsgesintertes SiC mit Si-Überguss) konnte kein zyklisches Versagen bestimmt werden. „RBSN (reaktionsgesintertes  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), SSN (gesintertes  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und HPSN (heißgepresstes  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) wurden bei Raumtemperatur im Biegeschwellversuch bis zu  $10^7$  Lastzyklen getestet. Bei allen Werkstoffen fiel die maximal ertragbare Spannung mit zunehmender Schwingspielzahl. Jedoch konnte nicht



festgestellt werden, ob das Risswachstum rein statischen Ursprungs gewesen ist oder die zyklische Beanspruchung auch darauf Auswirkungen hatte“ (115). Bei der RBSN-Keramik wurde aber die zyklische Ermüdung mittlerweile bestätigt, siehe Kapitel 3.3.1.

Auch bei vielen anderen Keramik-Werkstoffen konnten eine zyklisch bedingte Ermüdung festgestellt werden ( $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Nach [17] werden jedoch die Ermüdungseffekte überwiegend auf den oberen Spannungsbereich beschränkt und die Ermüdungsgrenzen z.B. der Wechselfestigkeit bzw. Dauerfestigkeit im Vergleich zu Metallen bei relativ hohen Spannungen bezogen auf die Ausgangfestigkeit liegend vermutet.

## 4 Vergleich zwischen spröden und duktilen Materialien

Bei allen Werkstoffen führt die zyklische Beanspruchung immer zu einem spröden Bruch. Selbst Stahl als duktiler Material bricht spröde unter dieser Beanspruchung. Bei häufig wiederholter Belastung lösen die Spannungsspitzen im Stahl eine Werkstoffzerrüttung aus, die bei ausreichendem Rissfortschritt zum Gewaltbruch führen.

Trotzdem ist das Ermüdungsverhalten der Keramiken nicht mit dem von metallischen Werkstoffen vergleichbar. In den folgenden Kapiteln werden die Unterschiede herausgearbeitet.

### 4.1 Probenanzahl, Belastungsfrequenz, Grenz-Schwingspielzahl

Folgende Probenanzahl, Belastungsfrequenz und Grenz-Schwingspielzahl wurden für die jeweiligen Versuche zur Ermittlung einer Wöhlerlinie gewählt:

St 37:

- je 7 bis 16 Versuche auf 2 bis 6 Spannungshorizonten, Tabelle 5
- $f = 30 \text{ Hz}$
- $N_D = 2 \cdot 10^6$

hochfeste Baustähle:

- je 6 bis 9 Proben für 2 bis 3 Spannungshorizonte im Zeitfestigkeitsbereich und je 14 bis 20 Proben für die Dauerfestigkeit
- $f = 30 \text{ Hz}$  (Rundproben 156 Hz)
- $N_D = 2,2 \cdot 10^6$

Bosch-Keramiken:

- 5 bis 10 Proben
- $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f = 2 \text{ Hz}$  (zur Prüfung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit) und  $f = 30 \text{ Hz}$  (zur Versuchszeitabkürzung)
- $N_D = 2,5 \cdot 10^6$

RBSN-Keramik:

- je Spannungshorizont 9 bzw. 10 Proben im Zeitfestigkeitsbereich und um die 20 Proben im Dauerfestigkeitsbereich, Abbildung 46
- $f = 1 \text{ Hz}$
- $N_D = 10^5$

BIOLOX-Keramik:

- keine Angaben zur Probenanzahl
- $f = 10 \text{ Hz}$
- $N_D = 4 \cdot 10^6$

## 4.2 Dauerfestigkeiten

In den nachfolgenden Tabellen werden die Dauerfestigkeiten der in dieser Arbeit behandelten Werkstoffe zusammengestellt und diskutiert.

**Tabelle 4-1:** Dauerfestigkeiten der Stähle aus Zug-Druck-Versuchen ( $P_{\bar{u}} = 50\%$ ,  $K_t = 1,02$ )

|                                |  | St 37<br>$f_{y,k} = 280 \text{ N/mm}^2$            | HSB 77V<br>$f_{y,k} \cong 800 \text{ N/mm}^2$     | HSB 55C<br>$f_{y,k} \cong 530 \text{ N/mm}^2$ |
|--------------------------------|--|--|---|---|
| $\kappa = \sigma_u / \sigma_o$ | Probenzustand  | $\sigma_{D(2 \cdot 10^6)}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_{D(2,2 \cdot 10^6)}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |   |
| $\kappa = -1$                  | geglüht 650°C/h<br>Walzhaut                          | 185  | ---   | ---   |
|                                | Normalisiert<br>Walzhaut                             | 170  | ---   | ---   |
|                                | nicht geblüht, in<br>Probenlängsrichtung geschliffen | 210  | 440   | 335   |
|                                | geschliffen, danach<br>normalisiert                  | 170  | ---   | ---   |
|                                | normalisiert, danach<br>geschliffen                  | 170  | ---   | ---   |
|                                | Anlieferungszustand<br>Walzhaut                      | $210 \pm 8$  | 265*  | 241   |
|                                | Rundproben poliert                                   | ---  | 508   | ---   |
| $\kappa = 0$                   | geglüht 650°C/h<br>Walzhaut                          | 300  | ---   | ---   |
|                                | Normalisiert<br>Walzhaut                             | 260  | ---   | ---   |
|                                | Vollstäbe poliert                                    | ---  | 720   | 490   |
|                                | Anlieferungszustand<br>Walzhaut                      | $333 \pm 15$                                       | 401*  | 347   |
|                                | Rundproben poliert                                   | ---  | 818   | ---   |
| $\kappa = 1/2$                 | Vollstäbe mit Walzhaut                               | ---  | 687   | 504   |
| $\kappa = -1/3$                | Vollstäbe mit Walzhaut                               | ---  | 410   | 398   |

\* für N-A-XTRA70,  $f_{y,k} \cong 750 \text{ N/mm}^2$

Bezüglich der Dauerfestigkeitswerte der Proben aus St 37 lässt sich folgendes zusammenfassen: Allgemein ist festzustellen, daß eine Wechselbeanspruchung zu einer stärkeren Ermüdung der Proben führt als eine Schwellbeanspruchung.

Das Spannungsarmglühen und Normalisieren der Proben reduzieren die Dauerfestigkeit. Ein Schleifen der Proben, weder vor noch nach dem Normalisieren, hat keinen weiter festigkeitsmindernden Einfluss. Auch die Versuche mit in Längsrichtung geschliffenen Walzhaut-Proben bestätigen, dass die Dauerfestigkeit nicht durch das Schleifen beeinflusst wird.

Die Glühbehandlungen der Stähle führten zwar zu niedrigen Dauerfestigkeiten, jedoch nicht durch ein spröder werden des Werkstoffes, sondern aufgrund von Gefügewandlungen, Vorkrümmungen oder Abbauen von Druckeigenspannungen. Es kann also bei glühbehandelten Stählen nicht von spröderen Werkstoffen gesprochen werden.

In Bezug auf die Probenform ist zu erkennen, dass die Rundproben höhere Festigkeiten erreichen als die Flachproben. Vermutlich liegt dies an Fehlstellen im Bereich der Kanten bei den Flachproben.

Weiterhin ist zu betonen, dass für Lastspielzahlen  $N > N_D = 2 \cdot 10^6$  die Dauerfestigkeit um etwa 2% bis 4% abnimmt. Kurt Klöppel<sup>1</sup> hob aber bereits hervor, dass „der praktizierte Dauerfestigkeitsnachweis mit den Stahlbaudauerfestigkeiten für  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastspiele in Wirklichkeit ein Zeitfestigkeitsnachweis [ist], denn die Wöhlerlinien erreichen erst deutlich unter diesen Spannungswerten Grenzlasterlastspielzahlen in der Größenordnung  $N > 10^7$ “ ([4], 676). Demzufolge dürfte die hier definierte Dauerfestigkeit nur als Schwingfestigkeit bezeichnet werden, siehe hierzu auch Kapitel 1.1.3.

Auch bei den hochfesten Baustählen ist deutlich zu erkennen, dass die Wechselbeanspruchung die Proben am meisten beansprucht. Im Gegensatz zu St 37 hat das Polieren aber eine erheblich festigkeitssteigernde Wirkung auf die höherfesten und spröderen Werkstoffe, dass heißt, die hochfesten Baustähle sind kerbempfindlicher als St 37.

Obwohl die Dauerfestigkeiten der hochfesten Baustähle erst bei  $N_D = 2,2 \cdot 10^6$  und nicht bei  $N_D = 2 \cdot 10^6$  (St 37) abgelesen wurden, sind ihre Werte absolut gesehen höher als die von St 37. Bezogen auf ihre Streckgrenze sind die Dauerfestigkeiten der hochfesten Stähle jedoch weitaus geringer als die eines St 37. Die Dauerfestigkeiten betragen für Vollstäbe mit Walzhaut für  $\kappa = -1$  nur 33% bis 45% und für  $\kappa = 0$  50% bis 65%, während die Dauerfestigkeiten von St 37 für  $\kappa = -1$  75% und für  $\kappa = 0$  1,19% (Druckeigenspannungen) betragen.

---

<sup>1</sup> Klöppel, Kurt, Paul, Professor für Statik und Stahlbau an der Technischen Hochschule Darmstadt, \*Aue im Erzgebirge 15.09.1901, †Darmstadt 13.08.1985

Dass in der Praxis hinsichtlich dauerbeanspruchter Konstruktionen, trotz der niedrigeren Dauerfestigkeiten, Stahl aus St 37 bevorzugt wird, liegt daran, dass die Dauerfestigkeiten der hochfesten Baustähle im geschweißten oder geschraubten Zustand weiter auf die Werte von St 37 fallen. Sie bringen folglich nur Vorteile, wenn ihre höheren Zeit- und Betriebsfestigkeiten ausgenutzt werden. Dazu zählen Einsätze bei hohen Mittelspannungen und  $\kappa$ -Verhältnissen, im Zeitfestigkeitsbereich bei geringen Lastspielzahlen (z.B.  $N = 10000$ ), bei niedriger Kerbwirkung und bei hohen Spitzenspannungen. Bei all diesen Einsätzen wird der hohe Abstand der Oberspannung zur Streckgrenze ausgenutzt, die ja bei St 37 bei hohen Oberspannungen sehr schnell überschritten werden kann.

**Tabelle 4-2:** Dauerfestigkeiten der Keramiken aus 4-Punkt-Biegeversuchen ( $N_D = 2,5 \cdot 10^6$ )

| Material  | Rundproben $K_{tb} = 1,08$   | Flachprobe $K_{tb} = 1,02$                                |
|---|--|---|
| $Al_2O_3$ -SG   | $\sigma_{D,-1} = 193 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma_{D,0} = 90 \text{ N/mm}^2$ | $\sigma_{D,-1} = 196 \text{ N/mm}^2$<br>---               |
| $Al_2O_3$ -TV 1863                                      | ---  | $\sigma_{D,-1} = 200 \text{ N/mm}^2$                      |
| $Al_2O_3$ -B7 (PVA)                                     | ---  | $\sigma_{D,-1} = 196 \text{ N/mm}^2$                      |
| $Al_2O_3$ -9005 sgt                                     | ---  | $\sigma_{D,-1} = 174 \text{ N/mm}^2$                      |
| $Si_3N_4$ (drucklos gesintert)                          | ---  | $\sigma_{D,-1} = 222 \text{ N/mm}^2$                      |
| $Si_3N_4$ (HIP)   | ---  | $\sigma_{D,-1} = 222 \text{ N/mm}^2$                      |
| $Al_2O_3$ -BIOLOX <sup>®</sup> ( $N_D = 4 \cdot 10^6$ ) | ---  | $\sigma_{DZ} = 160 \text{ N/mm}^2 \pm 160 \text{ N/mm}^2$ |
| Abmessungen und $K_t$ unbekannt                         | ---  | $\sigma_{DD} = 800 \text{ N/mm}^2 \pm 800 \text{ N/mm}^2$ |

Wie schon erwähnt, können die Dauerfestigkeiten der oben aufgeführten Keramiken unter Berücksichtigung der Streuungen und Auswertegenauigkeiten und verschiedenen Stoffparameter, Fertigungsverfahren, Bruchfestigkeiten und Formzahlen als untereinander gleichwertig betrachtet werden, wobei die  $Si_3N_4$ -Keramiken bei geeigneten Fertigungsbedingungen durchaus höhere Schwingfestigkeiten erzielen können, Abbildung 42.

Die gleichen Dauerfestigkeiten der beiden  $Si_3N_4$ -Varianten sind darauf zurückzuführen, dass beim heißisostatischen Pressen die Porosität nicht vollständig beseitigt werden konnte.

Am Dauerfestigkeitswert der BIOLOX<sup>®</sup>-Keramik unter Druck-Schwell-Beanspruchung ( $\sigma_{DD} = 1600 \text{ N/mm}^2$ ) ist zu erkennen, dass die Keramiken für Druckbeanspruchungen besonders geeignet sind.

Als Ursache für das gleichwertige Verhalten der Werkstoffe unter zyklischer Beanspruchung im Gegensatz zu ihren Biegebruchfestigkeiten einer statischen Beanspruchung wird auf die jeweils unterschiedlichen Versagensmechanismen zwischen statischer und zyklischer Ermüdung zurückgeführt.

Für alle Proben einschließlich des Flachstabes mit  $K_t = 1,0$  wurde einheitlich eine Neigung der Wöhlerlinie von  $k = 85$  und für die Dauerfestigkeitswerte eine Streuung von  $T_\sigma = 1 : 1,40$  bestimmt.

Generell lässt sich sagen, dass die sehr kleinen Probenabmessungen bei den Keramiken, verglichen zu in der Praxis gebräuchlichen Abmessungen zu erhöhten Festigkeitswerten führen, weil die Auftretenswahrscheinlichkeit von Oberflächendefekten oder Gefügefehlern wesentlich geringer ist. Um möglichst reale Festigkeitswerte zu erhalten, sollte das Versuchskonzept wenn möglich gängige Abmessungen berücksichtigen. Des weiteren sind beispielsweise die Art der Belastung und der Temperaturbereich zu beachten.

Ein direkter Vergleich der Dauerfestigkeitswerte von Stahl und Keramik ist aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungen (Zug-Druck- oder Biege-Beanspruchung) nicht möglich.

Bei fast allen Werkstoffen ist ein positiver Einfluss eines Spannungsgefälles vorhanden, vor allem bei dünnen Proben. Durch den Spannungsgradienten wird ein kleinerer Bereich auf Zug beansprucht, so dass auch die Wahrscheinlichkeit von bruchauslösenden Defekten geringer wird. Bei Stählen wurde festgestellt, dass sich die Steigerung der Dauerfestigkeit unter Biegebeanspruchung im Bereich weniger Prozente bewegt und bei hochfesten Stählen (hohe Sprödigkeit) noch geringer ist. Folglich ist dieser festigkeitssteigernde Effekt vom Grad des Gefälles (Probendicke) und der Struktur der Werkstoffe (Defektanfälligkeit) abhängig. Da die Keramik-Proben sehr dünn waren und auch eine hohe Defektanfälligkeit zeigten, müsste folglich die 4-Punkt-Biegebeanspruchung durch das auftretende Spannungsgefälle höhere Dauerfestigkeiten geliefert haben als dies bei einer reinen Zug-Druck-Beanspruchung der Fall gewesen wäre. Da allerdings bei den hochfesten Stählen der Effekt nachlässt und diese genauso wie Keramiken eine hohe Sprödigkeit aufweisen, kann diese Vermutung nur durch Versuche kontrolliert werden.

Bezüglich der Wöhlerlinien der Stahl- und Keramik-Werkstoffe lässt sich folgendes feststellen:

Die Wöhlerlinien der Stähle lassen sich, wie in Bild 1-2 dargestellt, in die drei Bereiche statische Festigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit einteilen.

Allgemein kann man aus den Wöhlerlinien der Stähle ablesen, dass die ertragbaren Spannungen des Zeitfestigkeitsbereichs im Bereich zwischen  $\sim 10^3$  bis  $10^6$  Lastspielen liegen und oberhalb von  $N = 10^6$  der Dauerfestigkeitsbereich beginnt. Da der Spannungsabfall ab ungefähr  $N = 2 \cdot 10^6$  nur noch unwesentlich ist, wurde diese Lastspielzahl als Grenz-Schwingspielzahl festgelegt, siehe auch Kapitel 1.1.3. Die Wöhlerlinie selbst wird mit wachsender Zugfestigkeit steiler. Die in Kapitel 2.3.3.2 angegebene Potenzfunktion  $N = N_D \cdot [\sigma_D/\sigma]^m$  gilt für alle metallischen Werkstoffe.

Der extrem flache Verlauf der Keramik-Wöhlerlinien, für den die Sprödigkeit als Ursache genannt wird, lässt jedoch keine Einteilung der Ermüdungsfestigkeit in Zeit- und Dauerfestigkeitsbereiche zu.

Für die keramischen Werkstoffe gibt es keine Dauerfestigkeit, wie sie bei metallischen Werkstoffen zu finden ist. Es lässt sich nur eine Art Dauerfestigkeitsgrenze ( $\sigma_{2,5 \cdot 10^6}$ ) feststellen, bei deren Überschreitung, aufgrund der extrem flachen Wöhlerlinien-Neigung, mit frühzeitigen Brüchen zu rechnen ist. Folglich sind die Keramik-Werkstoffe für Belastungen im Zeitschwingfestigkeitsbereich (8) sowie Betriebsbelastungen mit veränderlichen Amplituden, die teilweise diese Grenze überschreiten, ungeeignet. „Liegt jedoch die Betriebsbeanspruchung unterhalb dieser Grenze, so ist mit einem Rissfortschritt bzw. mit Brüchen nicht zu rechnen. In der Bemessungspraxis kann dies durch Festlegung einer zulässigen Spannung geschehen, die sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Streuung für eine geforderte Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt“ ([15], 162).

### 4.3 Walzhautkerbwirkung und Stabkanteneinfluss

Wie schon erwähnt, hat die Walzhaut keinen Einfluss auf die Dauerfestigkeiten des St 37, da die Walzhaut- und die Grenzrauhigkeit identisch sind. Große Kerben, Riefen, Narben usw., sind folglich als Ausnahme für die eigentliche Walzhautstruktur anzusehen. Sobald die Grenzrauhigkeit überschritten wird, kommt die Kerbwirkung der Walzhaut zum Tragen.

Da die Stabkanten ebenfalls beim St 37 eine neutrale Wirkung haben, gingen die Dauerbrüche der geprüften Vollstäbe zu etwa gleichen Anteilen von einer der vier Stabkanten wie von Walzhautkerben auf einer der beiden Stabbreitseiten aus.

Bei den hochfesten Baustählen hingegen wird die Schwingfestigkeit der Vollstäbe mit Walzhaut im Wesentlichen durch die Oberflächenstruktur der Stabbreitseiten bestimmt. Die Dauerbrüche gingen zu mehr als 80% aller Proben von einer Walzhautkerbe aus und zu etwa 20% von der Stabkante. Da die Walzhaut-Vollstäbe St 37, HSB 55C und HSB 77V etwa die gleiche Rauhtiefe haben, wird die Sprödigkeit der hochfesten Baustähle für diese Walzhautkerbwirkung verantwortlich sein.

Die Kerbwirkungszahl  $\beta_{K,D} = \sigma_{D, \text{poliert}} / \sigma_{D, \text{Walzhaut}}$  wächst mit steigender Zugfestigkeit. Im Bereich zwischen  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$  beträgt sie nahezu  $\beta_{K,D} = 1$  für St 37 und für hochfeste Baustähle bis  $f_{u,k} < 370 \text{ N/mm}^2$ . Ab  $f_{u,k} > 370 \text{ N/mm}^2$  ist die Kerbwirkungszahl etwa  $\beta_{K,D} = 1,75$  für HSB 77V. Allgemein gilt für hochfeste Baustähle ab  $f_{u,k} > 370 \text{ N/mm}^2$ :

$$\beta_{K,D} = 1 / (0,28 + 270 / f_{u,k})$$

Bei den Keramiken wurden keine schädlichen Kanteneinflüsse festgestellt.

#### 4.4 Bruchlage und Bruchfläche

Bei den Stählen traten alle Dauerbrüche, wie erwartet, in der Nähe des kleinsten Querschnittes  $A_0$  auf und die Bruchhäufigkeit nahm mit zunehmender Entfernung von  $A_0$  ab. Folglich bestätigt dieses Ergebnis den Bezug aller Spannungen auf den kleinsten Querschnitt  $A_0$ . Wobei die Neigung zur Bruchaußermittigkeit bei höherfesten Stählen zunahm; bei Stählen mit Walzhaut stärker als bei polierten Stählen. Die Begründung dafür ist in der größeren Spannungsstreuung der höherfesten Stähle zu finden.

Bei den in Kapitel 3.2 beschriebenen  $Al_2O_3$ - und  $Si_3N_4$ -Keramiken gingen alle dokumentierten Brüche erwartungsgemäß von der höchstbeanspruchten Stelle aus und verliefen transkristallin. Auslöser der Brüche waren in der Regel oberflächennahe Poren, Gefügauflockerungen oder Riesenkörner, Abbildung 45. Diese Fehler waren zwischen  $40\mu m$  und  $130\mu m$  tief und zwischen  $90\mu m$  und  $230\mu m$  breit. Nur bei der  $Al_2O_3$ -9005 sgt-Keramik (geringe Porosität) konnten diese als Bruchursache nicht festgestellt werden.

#### 4.5 Frequenzabhängigkeit

Bei den Stählen ist keine Frequenzabhängigkeit vorhanden, während bei den Keramiken bei sehr hohen Frequenzen und Amplituden der zyklische Ermüdungsprozess zunimmt. In der Nähe dieser Frequenzbereiche können Resonanzerscheinungen auftreten.

#### 4.6 Streuwerte und Mittelspannungsempfindlichkeit

Was die Streuwerte anbetrifft lässt sich zusammenfassen dass die höherfesten Stähle eine höhere Spannungsstreuung aufweisen als die Stähle St 37.

Die Festigkeiten der Keramiken wiederum sind wesentlich höheren Streuungen unterworfen als die der metallischen Werkstoffe. Aufgrund des extrem flachen Wöhlerlinien-Verlaufs lassen sich bereits im Zeitfestigkeitsbereich sehr hohe Streuungen registrieren, welche bei metallischen Werkstoffen in diesem Ausmaß erst im Dauerfestigkeitsbereich auftreten. Aufgrund dieser bekannten hohen Lastspielzahlstreuungen erübrigt sich ihre Ermittlung.

Nach [14] hängen die großen Streuungen unmittelbar mit der Bruchursache zusammen.

„Der Bruch geht von kleinen im Werkstoff vorhandenen Fehlern aus. Die Streuung der Festigkeit ist daher auf die Streuung der Fehlergröße zurückzuführen. Diese Tatsache ist auch die Ursache eines ausgeprägten Einflusses der Bauteilgröße auf die Festigkeit“ ([14], 83).

Die Mittelspannungsempfindlichkeit der hochfesten Baustähle ist kaum ausgeprägt:

$$M \cong 0,28$$



„Der Spannungsausschlag  $\sigma_A$  ist für positive Werte der Mittelspannung  $\sigma_m$  und für Oberspannungen unterhalb der Streckgrenze bei polierten Vollstäben aus Stahl praktisch unabhängig von  $\sigma_m$ ; für Stahl sinkt in diesem Bereich  $\sigma_A$  von 1,0 auf etwa 0,8 bis  $0,9 \cdot \sigma_W$ ; der wichtigste Dauerfestigkeitswert ist deshalb die Wechselfestigkeit  $\sigma_W$ “ ([2], 3).

Für die Keramiken wurde stellvertretend nur die Mittelspannungsempfindlichkeit von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SG mit  $K_t = 1,08$  ermittelt, welche  $M = 1,14$  beträgt.

Auf Zugmittelspannungen reagieren die keramischen Werkstoffe aufgrund ihrer hohen Mittelspannungsempfindlichkeit mit einer starken Abnahme der Ermüdungsfestigkeit. Druckmittelspannungen führen jedoch zu einer Steigerung der ertragbaren Spannungsamplitude.

Dieser auch bei Stählen gering vorhandene Effekt hängt im Wesentlichen damit zusammen, dass sich (Mikro)-Risse in der Druckphase schließen.

## 5 Vergleiche mit Glas

In Tabelle 4 ist die chemische Zusammensetzung von Silicatgläsern zusammengestellt.

Floatglas hat folgende charakteristische Materialkennwerte:

Biegezugfestigkeit:  $\sigma_{k,t} = 45 \text{ N/mm}^2$

Druckfestigkeit:  $\sigma_{k,c} = 500 \text{ N/mm}^2$

E-Modul:  $E = 70000 \text{ N/mm}^2$

Rohdichte:  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3 = 2,5 \text{ g/cm}^3$

Querkontraktionszahl:  $\mu = 0,22$

Ein entscheidender Unterschied zu den Werkstoffen Stahl und Keramik findet sich bei Glas im Gefügebau. Während Stahl und Keramik heterogene Werkstoffe mit örtlichen Fehlstellen im kristallinen Gitter sind, setzt sich der Werkstoff Glas aus einem amorphen  $\text{SiO}_2$ -Netzwerk zusammen, so dass Glas als homogener Werkstoff bezeichnet werden kann. Da die zwischen den Einzelmolekülen wirkenden Bindungskräfte gegenüber kristallinen Festkörpern sehr viel geringer sind, versagt der amorphe Festkörper Glas unter einem äußeren Zwang deutlich schneller.

Die extrem hohe Sprödigkeit des Glases ist aber, wie bei den Keramiken, der entscheidende Nachteil für das Bruchverhalten. Nur können im Gegensatz zu Keramiken die Brüche nicht von Gefügefehlern in Form von Poren, Riesenkörnern oder Gefügeflockungen ausgehen, denn die einzig denkbaren Gefügefehler im Glas-Werkstoff sind nur in einzelnen Fällen vorhandene Nickel-Sulfid-Einschlüsse, welche wiederum nur bei Einscheibensicherheitsglas zu Spontanbrüchen aufgrund von Umwandlungen führen. Folglich ist Glas der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -9005 sgt-Keramik am ähnlichsten. Denn, wie schon erwähnt, waren bei dieser Keramik aufgrund der geringen Porosität oben genannte bruchauslösenden Gefügefehler auch nicht vorhanden. Die entscheidenden Bruchauslöser bei Glas werden, wie unter statischer Belastung, die Oberflächendefekte sein.

Da bei den Keramiken der extrem flache und stark streuende Wöhlerlinienverlauf auf die hohe Sprödigkeit zurückgeführt wird, könnte sich auch bei den Versuchen mit Glas ein ähnlicher Verlauf mit entsprechend großen Streuungen ergeben. So dass auch hier eventuell kein asymptotisches Verhalten an eine Dauerfestigkeit zu erwarten wäre. Davon kann man jedoch nicht sicher ausgehen, da sich bei den hochfesten Baustählen trotz der hohen Sprödigkeit und Festigkeitsstreuung eine Dauerfestigkeit einstellt. Nach [17] wird sogar behauptet, dass der Glaswerkstoff aufgrund seiner Homogenität sich unter schwingender Beanspruchung ähnlich wie unter statischer Last verhält, Kapitel 3.3.1. Folglich kann nur über Versuche ein Einblick über das Verhalten von Glas unter schwingender Beanspruchung gewonnen werden.

## 6 Versuchskonzept zur Untersuchung der Dauerfestigkeit von Glas

Ziel dieser Arbeit war es, durch die Betrachtung vorangegangener Untersuchungen an spröden und duktilen Werkstoffen ein Versuchskonzept zur Bestimmung von Wöhlerlinien für den Werkstoff Glas zu entwickeln, welches im folgenden vorgestellt wird.

Umwelteinflüsse:

Eventuelle Einflüsse auf die Dauerfestigkeit, resultierend aus Feuchtigkeit oder erhöhter Temperatur, sollen im Rahmen dieser Arbeit zunächst nicht berücksichtigt werden.

Die Temperatur soll bei der Versuchsdurchführung ca. 23°C (Raumtemperatur) betragen. Jedoch sollte auf Erwärmungsprobleme während des Versuchsablaufes geachtet werden. Wenn nötig sollten die Proben mit einem Ventilator gekühlt werden.

Die relative Luftfeuchte soll 60% betragen.

Versuchsaufbau:

Die Versuche können kraftgesteuert gefahren werden, da Glas ein linear-elastisches Werkstoffverhalten aufweist, und somit keine Kriecherscheinungen unter zyklischer Dauerbeanspruchung zu erwarten sind, wenn die Versuche nicht zu langsam gefahren werden ( $f = 1/\text{min}$ ). Bisherige Untersuchungen zum Kriechverhalten von Glas lassen ein gewisses Maß an Kriechverformungen unter statischer Dauerbeanspruchung vermuten [22].

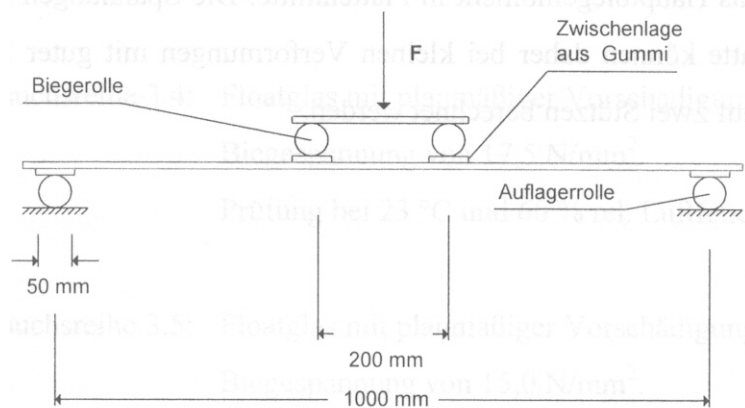
Obwohl der Zug-Druck-Versuch im Vergleich zu Biegeversuchen niedrigere und somit auf der sicheren Seite liegende Werte liefert, ist der Biegeversuch im Fall von Glas zu bevorzugen, da dieser Werkstoff überwiegend durch Flächenlasten auf Biegung beansprucht wird. Die flächenhafte Plattenbeanspruchung wird durch eine 4-Punkt-Biegeprüfung am besten simuliert. Zudem führt der 4-Punkt-Biegeversuch zu kleineren Festigkeitswerten als ein 3-Punkt-Biegeversuch, da eine größere Fläche der maximalen Beanspruchung unterworfen ist, und somit die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins bruchauslösender Oberflächendefekte größer ist. Folglich liegt man mit dem 4-Punkt-Biegeversuch im Vergleich zum 3-Punkt-Biegeversuch auf der sicheren Seite.

Weitere Vorteile sind:

- Die Versuche können an relativ kleinen Proben mit einfacher Geometrie durchgeführt werden.
- Der 4-Punkt-Biegeversuch ist auch im Schwellbereich anwendbar.

Um Versuche einfach auswerten zu können, werden für Ermüdungsversuche Belastungen, die einaxiale Spannungen hervorrufen, bevorzugt. Ein Doppellringbiegeversuch Abbildung 47 kommt insofern nicht in Frage als im Probekörper radiale und tangentielle Spannungen auftreten. Um eine Wöhlerlinie zu ermitteln müssten die Schwingspielzahlen über die Vergleichsspannungen aufgetragen werden. Zudem könnten mit dem klassischen Versuchsaufbau nur Schwellbeanspruchungen angesetzt werden. Um eine Wechselbeanspruchung zu ermöglichen, müsste der Versuchsaufbau auf beiden Seiten jeweils einen Stütz- sowie Lastring aufweisen. Die Lastringe müssten durch zwei aufeinander abgestimmte Zylinder betrieben werden. Eine weitere Möglichkeit, die Lastringe zu betreiben, wäre deren Zusammenschluss mit einer steifen Verbindung, die um die Glasscheibe herum führen müsste. Vorteil der letzten Variante wäre der Betrieb mit nur einem Zylinder.

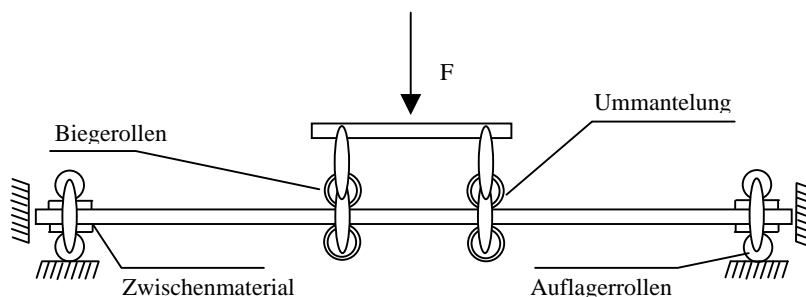
In Bild 6-1 ist der Versuchsaufbau für einen statischen 4-Punkt-Biegeversuch dargestellt:



**Bild 6-1:** Versuchsaufbau für eine Vierpunkt-Biegeprüfung; aus [22]

Für eine Schwellbeanspruchung würde der klassische Versuchsaufbau ausreichen.

Um die Aussagekraft der Versuche zu maximieren, wäre zusätzlich eine Wechselbeanspruchung ratsam, was zur Folge hat, dass im Versuchsaufbau auf beiden Seiten der Probe Auflager- und Belastungsrollen angebracht werden müssen.



**Bild 6-2:** Vorschlag für den Versuchsaufbau

Die gegenüberliegenden Rollen sind jeweils am Rand der Probe miteinander verbunden, so dass die Lasteinleitung über einen Zylinder möglich ist. Um ein eventuelles Auswandern der Proben zu verhindern, befinden sich seitlich der Proben Führungslager [15]. Generell gilt, dass der Kontakt zwischen Glas und härteren Werkstoffen ( $E > 70000 \text{ N/mm}^2$ ) vermieden werden muss, indem man weiche Zwischenmaterialien verwendet (z.B. Auflagerrollen in Bild 6-2). Möglich wäre auch, die Rollen mit dem weichen Material zu ummanteln (z.B. Biegerollen in Bild 6-2).

Beim Einlegen der Proben für Schwelllastversuche sollte darauf geachtet werden, dass die Zinnbadseite zur zugbeanspruchten Seite gelegt wird, da sie eine geringere Festigkeit aufweist. Der Grund dafür sind Einlagerung von Zinnionen in die Glasoberfläche beim Herstellungsprozess von Floatglas und Oberflächenschäden hervorgerufen durch den Transport des Glases auf Rollen. Unerwünschte Zusatzbeanspruchungen - aus inhomogenen Momentenverläufen durch überlagerte Torsions- und Biegemomente sowie aus Pressung und Reibung zwischen Biegebalken und Auflagerrollen - müssen beim Einbau in die Prüfmaschine und der Versuchsdurchführung vermieden werden.

Ebenso ist der Einfluss der Systemnachgiebigkeit zu berücksichtigen. Der Bruch-Zeitpunkt wird durch einen integrierten Schwingenspielzähler festgehalten. Bricht die Probe, stellt die Prüfmaschine den Betrieb ein.

Bevor die Proben jedoch der Schwingungsbeanspruchung unterzogen werden, müssen sie zunächst visuell auf Oberflächenschäden geprüft werden.

Als Anfangsbeanspruchung kann die Oberspannung der Biegezugfestigkeit von Floatglas ( $\sigma_{k,t} = 45 \text{ N/mm}^2$ ) gleichgesetzt werden. In weiteren Versuchsserien kann dann die Beanspruchung schrittweise herabgesetzt werden. Bei Stahl lagen die Beanspruchungsstufen zwischen  $d = 2,5 \text{ N/mm}^2$  und  $d = 10 \text{ N/mm}^2$ .

Belastungsfrequenz:

Die maximal einstellbare Frequenz bei den Versuchen mit Glas kann, da nur unzureichende Kenntnisse vorhanden sind, ausschließlich iterativ bestimmt werden. Es ist zu prüfen, ob sie im Bereich der Eigenfrequenz (ungünstigste Werte), äquivalent zu den Experimenten mit Stahl und Keramik zwischen 20 Hz und 40 Hz oder sogar niedriger liegt. Da Glas bezüglich der Sprödigkeit der Keramik am nächsten steht, könnte der erste Tastversuch mit 20 Hz gefahren werden. Bei dieser Frequenz steht die Feststellung des Bruchzeitpunkts als Ziel des Versuchs im Vordergrund.

Falls das Risswachstum im Glas beobachtet werden möchte, sollte im Zeitfestigkeitsbereich bei hohen Spannungshorizonten mit einer sehr niedrigen Frequenz gefahren werden, z.B. 0,1 Hz

Um eine Frequenzabhängigkeit, wie sie bei Keramiken im hohen Frequenzbereich festgestellt wurde, bei Glas untersuchen zu können, müssten auch hier Versuche mit unterschiedlichen Frequenzen gefahren werden.

#### Grenz-Schwingspielzahl:

Eine Grenz-Schwingspielzahl lässt sich erst nach ersten Tastversuchen festlegen, so dass für Glas bisher keine angegeben werden kann. Doch dürfte sich diese aufgrund der Ähnlichkeit zur Keramik eventuell in Bereich von  $N_D = 2,5 \cdot 10^6$  liegen.

#### Probenform:

Als Probenform wäre ein schmaler Plattenstreifen vorteilhaft, da ein einachsiger Lastabtrag im Versuch gewährleistet würde. Die Kanten der Proben müssen bearbeitet werden, um den Einfluss der Kanten möglichst gering zu halten.

Die Abmessungen der in dieser Arbeit erwähnten Stahl- und Keramik-Prüfkörper scheinen im Hinblick auf die Größen des zum Einsatz kommenden Glases als zu klein, jedoch werden den Werkstoff schwächende Einflüsse dadurch stark eingeschränkt und führen folglich zu einem reinen und somit höheren Werkstoffkennwert, der jedoch für den realen Einsatz nicht unmittelbar übertragen werden kann. Da bei Glas die Oberflächendefekte und Einschlüsse einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit haben, sollten auf jeden Fall unterschiedlich große Proben geprüft werden, um den Grad des Oberflächeneinflusses, welcher unter statischer Belastung als entscheidend gilt, bei Schwingungsbeanspruchung bewerten zu können. Die Proben sollten auch mindestens mit zwei unterschiedlichen Dicken geprüft werden, um den Einfluss des durch die Biegebeanspruchung auftretenden Spannungsgefälles einschätzen zu können.

In [15] werden zur Probenform noch folgende Hinweise gegeben:

Um hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen sind schlanke Proben zwingend notwendig. Denn mit Verringerung des Verhältnisses der Probenhöhe  $h$  zum unteren Auflagerabstand  $s$  werden systematische Fehler vermindert, „die in Verbindung mit den Spannungskonzentrationen an den Auflagepunkten und durch den aus der Querkraft resultierenden Scherspannungen stehen“ ([15], 37). Folglich schreibt die Japanischen Industrienorm JIS R 1602-1986 eine maximale Probenhöhe von  $1/20$  des unteren Auflagerabstands im 3-Punkt-Biegeversuch und eine maximale Probenhöhe von  $1/30$  des unteren Auflagerabstands im 4-Punkt-Biegeversuch vor.

Vorschlag für eine Probenform:

$$l \times b \times h = 500 \times 100 \times 8 \text{ mm}^3$$

$$E = 70000 \text{ N/mm}^2$$

$$I = b \cdot h^3 / 12 \approx 4267 \text{ mm}^4$$

$$W = b \cdot h^2 / 6 \approx 1067 \text{ mm}^3$$

Voraussetzung: gleiche Lasteinleitungsweiten  $\rightarrow$  Auflagerkräfte sind jeweils  $F/2$

$$M = F/2 \cdot l/3 = \sigma_{k,t} \cdot W$$

$$F/2 \cdot 500 \text{ mm} / 3 = 45 \text{ N/mm}^2 \cdot 1067 \text{ mm}^3 \rightarrow \text{anzubringende Last: } F = 576,18 \text{ N}$$

$$w = \frac{n \cdot P \cdot l^3}{76,8 \cdot EI} \left( 1 - \frac{0,8}{n^2} - \frac{0,2}{n^4} \right); \text{ mit } n = 3 \text{ und } P = F/2 \rightarrow \text{Durchbiegung: } w \approx 4,3 \text{ mm}$$

Probenanzahl:

Bezüglich der Probenanzahl lässt sich sagen, dass vor allem bei spröden Werkstoffen wie Glas zur statistischen Absicherung der Ergebnisse auf mehreren Beanspruchungshorizonten jeweils mehrere Proben (für eine grobe Schätzung mindestens 4 - 6 Proben auf 2 bis 3 Spannungshorizonten im Zeitfestigkeitsbereich) geprüft werden sollten, wobei im Dauerfestigkeitsbereich aufgrund der höheren Streuwerte eine höhere Versuchsanzahl nötig ist. Um jedoch einen groben Überblick über die Wöhlerkurve und einen ungefähren Wert für die Dauerfestigkeit zu bekommen, sollten möglichst wenige Einzelversuche gemäß dem Treppenstufen-Verfahren gefahren werden.

Mittelspannungsempfindlichkeit:

Um die Mittelspannungsempfindlichkeit testen zu können, müssen Versuche mit unterschiedlichen Mittelspannungen aber gleicher Schwingbreite gefahren werden.

Auswertung:

Der Bruchursprung sollte bei allen Proben lokalisiert und der Abstand zu den Lasteinleitungsstellen gemessen werden. Ferner sollte untersucht werden, ob der Dauerbruch von einer Stabkante oder Oberflächendefekten ausgeht. Sollten die Proben im Dauerversuch nicht versagen und keine Risse zu sehen sein, ist eine Prüfung auf einem höheren Spannungshorizont bis zum Bruch empfehlenswert, so dass Proben eingespart werden.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach der im Kapitel 1.1.2 beschriebenen Vorgehensweise.

Ausblick:

Wie schon in Kapitel 1.1 erwähnt, spiegelt die Wöhlerlinie die unmittelbaren auf den Probenkörper wirkenden Einflüsse wider. So dass kleine ungekerbte Proben bei Raumtemperatur unter konstanter Belastungsamplitude nur ein unzureichendes Anwendungsgebiet für Gläser abdecken.

Daher sollte, falls eine spezifisch-zyklische Ermüdungserscheinung bei Glas festgestellt werden sollte, für wirklichkeitsgetreuere Ergebnisse folgende Versuchsvariationen durchgeführt werden:

- Durchführung der Versuche mit Veredelungsprodukten wie teilvorgespanntes Glas und Einscheiben-Sicherheitsglas, um die Einflüsse von Einschlüssen und Eigenspannungen bewerten zu können
- Anpassung der Geometrie an den dafür vorgesehenen Einsatz (Probengröße, Probenform) zur Beurteilung von Oberflächendefekten (Kerbwirkung)
- Variation der Belastungsart in verschiedenen Versuchsserien (Axial, Biegung, Torsion)
- Berücksichtigung der Umgebung (Temperatur, (Korrosions)-medien), siehe Kapitel 2.4
- Aufbringung von wirklichkeitsgetreuen Lastfolgen, falls bekannt (Beanspruchung auf Betriebsfestigkeit?)
- Versuche mit gealterten Proben unter zyklischer Beanspruchung



## 7 Verwendete Symbole

### Griechische Symbole:

|  |   |
|--|---|
| $\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_A$  | Spannungsschwingbreite  |
| $\alpha_k$ (ältere Bezeichnung)  | Formzahl $K_t$  |
| $\beta_{K,D} = \sigma_{D, \text{poliert}} / \sigma_{D, \text{Walzhaut}}$ | Kerbwirkungszahl  |
| $\varepsilon_{gl}$   | Gleichmaßdehnung ( $\hat{=}$ Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit) |
| $\kappa = \sigma_u / \sigma_o = \min  \sigma  / \max  \sigma $           | Spannungsverhältnis, $-1 \leq \kappa \leq 1$                          |
| $\kappa_d$   | Spannungsverhältnis im Druckbereich                                   |
| $\mu$  | Querkontraktionszahl  |
| $\rho$   | Rohdichte   |
| $\max \sigma$  | Kerbspannung  |
| $\sigma_A$   | Spannungsausschlag  |
| $\sigma_B$ (ältere Bezeichnung)  | Bruchspannung $f_{u,k}$   |
| $\sigma_D$   | Dauerschwingfestigkeit  |
| $\sigma_{D,o}$   | Dauerschwingfestigkeit als Oberspannung                               |
| $\sigma_F$ (ältere Bezeichnung)  | Fließspannung $f_{y,k}$   |
| $\sigma_{k,c}$   | Druckfestigkeit von Glas  |
| $\sigma_{k,t}$   | Biegezugfestigkeit von Glas   |
| $\sigma_m$   | Mittelspannung  |
| $\sigma_o, \max  \sigma $  | Oberspannung, betragsmäßig größere Spannung                           |
| $\sigma_u, \min  \sigma $  | Unterspannung, betragsmäßig kleinere Spannung                         |
| $\sigma_R$   | Reißfestigkeit  |

### Lateinische Symbole:

|          |   |
|----------|---|
| $A$      | wahrer Querschnitt, durch Fließen reduzierter Stabmittenquerschnitt |
| $A_0$    | Fläche des Ausgangsquerschnitts                                     |
| $A_5$    | Bruchdehnung  |
| $A_{Br}$ | Bruchquerschnitt  |
| $E$      | Elastizitätsmodul   |

|  |  |
|--|--|
| $F$  | äußere Last  |
| $F_{Br}$ (ältere Bezeichnung)                  | Bruchquerschnitt $A_{Br}$  |
| $F_0$ (ältere Bezeichnung)                     | Fläche des Ausgangsquerschnitts $A_0$  |
| $G$  | Schubmodul   |
| $I$  | Flächenträgheitsmoment   |
| $K$  | Kompressionsmodul  |
| $K_t = (\max \sigma) / S_{netto}$              | Formzahl   |
| $M$  | Moment   |
| $M = 2 \cdot \sigma_{D,-1} / \sigma_{D,0} - 1$ | Mittelspannungsempfindlichkeit   |
| $M = \sigma_{a,-1} / \sigma_{a,0} - 1$         | Mittelspannungsempfindlichkeit   |
| $P$  | äußere Last $F$  |
| $P_{\bar{u}} = m / (n+1) \cdot 100\%$          | Überlebenswahrscheinlichkeit   |
| $R_t$  | Rautiefe   |
| $S_{netto}$                                    | Nenn- bzw. Durchschnittsspannung   |
| $T$  | Temperatur   |
| $1:T_\sigma = \sigma_{10} / \sigma_{90}$       | Spannungsstreuung  |
| $1:T_N = N_{10} / N_{90}$                      | Lastspielzahlstreuung; Lastspielvielfache der stärksten zur schwächsten Probe von insgesamt $n$ geprüften Proben |
| $W$  | Widerstandsmoment  |
| $Z = A_{Br} / A_0$                             | Brucheinschnürung  |
| $d$  | Stufenabstand  |
| $f_{u,k}$                                      | Zugfestigkeit, Bruchspannung   |
| $f_{y,k}$                                      | Fließspannung, Streckgrenze  |
| $m$  | Ordnungszahl der nach absteigender Größe von $N$ geordneten Proben   |
| $n$  | Anzahl der Versuche auf dem jeweiligen Horizont  |
| $w$  | Durchbiegung   |

## 8 Begriffserklärungen

### *Dauerfestigkeit:*

„Die größte von einem Bauteil in sehr großer Zahl (beliebig oft) ertragenen Schwingbeanspruchung ist die Dauerfestigkeit dieses Bauteils“ ([9], 16).

### *Ermüdung:*

„Abnahme der maximal ertragbaren Spannung mit zunehmender Lastspielzahl“ ([17], 115).

*Gleichartige Probekörper:* siehe Praktisch gleiche Bauteile

### *Grenz-Schwingspielzahl:*

Sie „gilt nur für den Einstufenversuch und hat für den Betriebsfestigkeitsversuch keine Bedeutung. Sie beträgt für Stahl  $10^7$  Schwingspiele, für Leichtmetall  $10^8$  Schwingspiele. Zur Abkürzung der Prüfdauer ist für Stahl die endliche Grenzschningspielzahl 2 bis  $5 \cdot 10^6$ , für Leichtmetall 1 bis  $5 \cdot 10^7$  Schwingspiele zugelassen“ ([9], 377).

### *Kontrollversuch:*

„Im Kontrollversuch wird festgestellt, ob eine Probe oder ein Bauteil eine bestimmte vorgegebene Schningspielzahl für die Zeit-, Dauer- oder Betriebsfestigkeit ohne Bruch erreicht. Wegen der möglichen Streuungen sind mindestens drei gleichartige Versuche durchzuführen“ ([9], 384).

### *Mittelspannungsempfindlichkeit:*

„Der Einfluss einer Mittelspannung auf die ertragbare Spannungsamplitude wird durch die Mittelspannungsempfindlichkeit beschrieben,

$$M = \sigma_{a,-1} / \sigma_{a,0} - 1 = 2 \cdot \sigma_{D,-1} / \sigma_{D,0} - 1$$

die für eine festgelegte Schningspielzahl durch den Vergleich der unter Wechsel- und Schwellbelastung ermittelten Wöhlerlinien bestimmt wird“ ([13], 14).

„In Abhängigkeit von der Zähigkeit eines Werkstoffes können Zugmittelspannungen die ertragbare Spannungsamplitude mindern, Druckmittelspannungen hingegen erhöhen“ ([13], 14).

### *Oberflächenbearbeitungen:*

#### *Schleifen:*

Spanabhebende Bearbeitung mit geometrisch undefinierter Schneide mit Schleifsteinen, -scheiben oder -bändern verschiedener Kornart und Körnung zur Erzielung feiner Oberflächen mit hoher Maßgenauigkeit und Oberflächengüte.<sup>1</sup>

*Schlichten:*

Oberflächenangabe nach DIN 3141 (zurückgezogen und nicht mehr für Neukonstruktionen anwendbar, wird ersetzt durch ISO 1302). Mittelfeine spanabhebende Fertigung einer Werkstückoberfläche mit definierter Schneide, die nach dem Schrappen erfolgt. Das Schlichten ergibt schon sehr feine Oberflächen mit Rauhtiefen Rz von etwa 10 µm.<sup>1</sup>

*Schrappen:*

Oberflächenangabe nach DIN 3141 (zurückgezogen und nicht mehr für Neukonstruktionen anwendbar, wird ersetzt durch ISO 1302). Grobe, spanende Bearbeitung (z. B. Vordrehen) mit definierter Schneide.<sup>1</sup>

*Praktisch gleiche Bauteile:*

Definitionsgemäß sind Bauteile gleich, wenn ihre mechanischen Eigenschaften vollkommen übereinstimmen. Da in der Praxis jedoch keine identischen Bauteile existieren, werden Bauteile, die hinsichtlich Werkstoff, Geometrie, Bearbeitung und Fertigung innerhalb festgelegter Toleranzen übereinstimmen, als praktisch gleiche Bauteile bezeichnet.

*psi (pounds per square inch):*

1psi  $\cong$  0,00689476 N/mm<sup>2</sup>

*Randaufkohlung:*

Bei einer Randaufkohlung wird Stahl in eine kohlenstoffanreichernde Substanz erwärmt, so dass der Rand des Stahls die C-Atome aufnimmt. Damit wird eine Randschichtverfestigung erreicht.

*Randentkohlung:*

Mit einer Randentkohlung wird eine Randschichtentfestigung erzielt.

Auf der Oxidation der Randschichten eines glühenden Werkstücks bei der Warmformgebung oder Wärmebehandlung beruhender Vorgang. Dabei entzieht der Luftsauerstoff dem glühenden Werkstoff Kohlenstoff, es entsteht eine sogenannte Weichhaut, die für bestimmte Ansprüche unerwünscht ist und eine schlechte Härteannahme zur Folge hat (z.B. bei Werkzeugen, Federn, Wälzlagern, vergüteten Teilen).<sup>1</sup>

*Rekristallisation:*

Rekristallisation ist eine Kornneubildung im Gefüge. Oberhalb einer bestimmten Temperatur, der Rekristallisationstemperatur, wird die in den Versetzungen gespeicherte Energie frei. Sie wird zur treibenden Kraft für die Entstehung neuer, beinahe versetzungsfreier Kristallkörner. Je höher der Umformgrad, desto niedriger ist die Rekristallisationstemperatur.<sup>1</sup>

*Riefen:*

Mehr oder weniger tiefe und sichtbare Rillen, welche die Werkzeuge auf der Werkstückoberfläche - z.B. beim Drehen, Schälen, Walzen und auch Sägen - hinterlassen. Beim Kaltziehen können außen (bei Rohren auch innen) sogenannte Ziehriefen entstehen.<sup>1</sup>

*Schmirgelleinen:*

Schmirgelleinen besteht im Gegensatz zu Schmirgelpapier nicht aus Papier, sondern aus robusten Stoff (Leinen).

*Schwellfestigkeit:*

Sonderfall der Dauer(schwing)festigkeit für eine zwischen Null und einem Höchstwert an- und abschwellige Spannung. Sie ist damit gleich der Schwingbreite.<sup>1</sup>

*Sprödigkeit:*

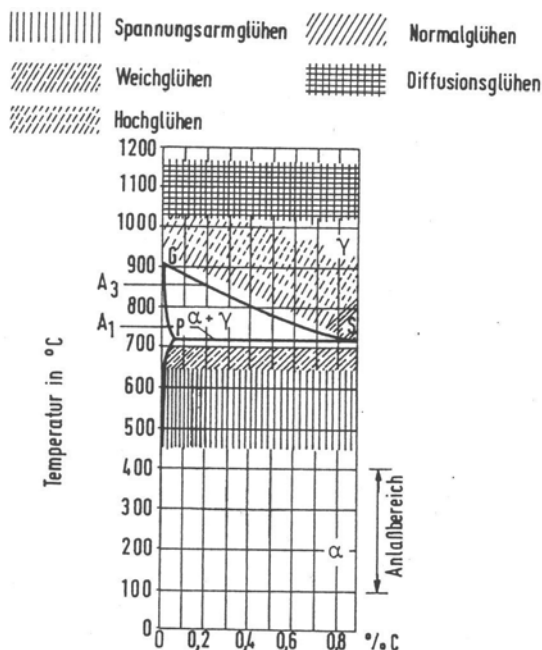
„Eigenschaft, ohne vorausgehende plastische Verformung zu versagen“ ([14], VII).

*Statische Festigkeit:*

„Die statische Festigkeit eines Bauteils ist gleich der größten vom Bauteil ertragenen statischen Beanspruchung“ ([9], 16).

*Wärmebehandlungen:*

Neben der chemischen Zusammensetzung der Stähle spielt auch deren Gefügeaufbau für die Zähigkeitseigenschaften eine entscheidende Rolle.



**Bild 8-1:** aus [7]

*Anlassen:*

Unter Anlassen versteht man eine Erwärmung auf eine vorgegebene Temperatur unter der  $A_1$ -Linie mit anschließendem Abkühlen, meist an ruhender Luft.

Man unterscheidet drei Anlassstufen:

1. Anlassstufe: ca. 80°C bis 200°C

Abbau der Härtespannungen und der „Glashärte“ (sehr spröder Zustand) ohne wesentlichen Verlust an Härte. Es kann zu Verzug kommen.

2. Anlassstufe: ca. 200°C bis 350°C

Weitere Entspannung.

3. Anlassstufe: ca. oberhalb 350°C

Entstehung eines feineren Korngefüges und somit einer höheren Zähigkeit. (Das kubische Gitter des Martensits geht in das kubische Gitter des Ferrits über).

*Härten und Vergüten:*

Hier wird der Probekörper oberhalb der  $A_3$ - oder  $A_1$ -Linie erwärmt und anschließend in Wasser, Öl oder Luft schnell abgekühlt, so dass die Härte durch Martensitbildung beträchtlich erhöht wird. Häufig entsteht auch mehr oder weniger großer Verzug, und es besteht die Gefahr der Bildung von Härterissen (außen) und auch von Schrumpfspannungsrissen (innen). Um dem verspannten, harten und spröden Werkstoff wieder Zähigkeit zu verleihen, wird der Stahl im Bereich der  $A_1$ -Linie angelassen und wieder langsam gekühlt. Dieser Vorgang (Härten + Anlassen) nennt sich Vergüten.

*Normalglühen (bzw. Normalisieren):*

Bei diesem Glühvorgang wird der Probekörper nach der Fertigung erneut oberhalb des oberen Umwandlungspunktes  $A_3$  erwärmt und langsam abgekühlt. Dadurch kommt es zu einer Umkörnung des Gefüges, die eine gleichmäßig feinkörnige Werkstoffstruktur mit guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften (geringe Neigung zum Spröbruch) mit sich bringt.

*Spannungsarmglühen (früher: Spannungsfreiglühen):*

Beim Spannungsarmglühen wird der Werkstoff zwischen 450°C bis 650°C erwärmt und anschließend langsam abgekühlt. Ziel dieses Vorgangs ist der Abbau und Ausgleich innerer (Eigen-) Spannungen ohne wesentliche Änderung der vorhandenen Eigenschaften.

*Wasservergüten:*

Dieser Begriff weist lediglich darauf hin, dass es sich beim Abkühlmedium um Wasser handelt.

*Walzzunder:* Siehe Zunder

*Walzriefen:* Siehe Riefen

*Walzhaut:*

Beim Warmwalzen entstehende, festhaftende Oxidhaut von blauschwarzer Farbe. Sie bietet einen sehr guten Korrosionsschutz, erschwert aber einen Rostschutzanstrich.<sup>1</sup>

*Wechselfestigkeit:*

Sonderfall der Dauer(schwing)festigkeit mit der Mittelspannung = 0. Die Spannung wechselt zwischen gleich großen Plus- und Minuswerten; ihr Betrag gleicht dem der Ober- bzw. Unterspannung.<sup>1</sup>

*Zeitschwingfestigkeit (Zeitfestigkeit):*

„Zeitschwingfestigkeit (...) heißt der Spannungswert  $\sigma_D$  für Bruch-Schwingspielzahlen  $N$ , die geringer als die Grenz-Schwingspielzahl sind. Die Symbole der Zeitfestigkeit sind die gleichen wie für die Dauerfestigkeit; sie tragen ebenfalls die Bruch-Schwingspielzahl als Zeiger“ ([9], 4).

*Zunder:*

Oxidschicht, die sich beim Glühen, Walzen oder Schmieden von Stahl auf seiner Oberfläche bildet. Eine Zunderdecke besteht aus mehreren Oxidationsschichten, die sich chemisch unterscheiden (*Walzhaut*).<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>entnommen aus [www.droesser.de](http://www.droesser.de) (21.11.02)

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Bühler, H., Schreiber, W.: *Lösung einiger Aufgaben der Dauerschwingfestigkeit mit dem Treppenstufen-Verfahren*. Archiv für Eisenhüttenwesen, 28, 1957, S. 153-156, Referenziert in [6]
- [2] DIN 50 100: *Dauerschwingversuch. Begriffe Zeichen Durchführung Auswertung*. Februar 1978
- [3] Hempel, M., Houndremont, E.: *Beitrag zur Kenntnis der Vorgänge bei der Dauerbeanspruchung von Werkstoffen*. Stahl und Eisen 73 (1953): 1503, Referenziert in [5]
- [4] Klee, S., Seeger, T.: *Entwicklungen zum Betriebsfestigkeitsnachweis im Stahlbau*. Stahlbau 70 (2001), Heft 9, S. 675-684
- [5] Klöppel, K., Seeger, T.: *Experimentelle und theoretische Beiträge zum Schädigungsverhalten dauerbeanspruchter Vollstäbe und Kerbstäbe aus St 37 und St 52*. Veröffentlichungen des Institutes für Statik und Stahlbau der TH-Darmstadt, Heft 3, Darmstadt, 1967
- [6] Klöppel, K., Seeger, T.: *Zeit- und Dauerfestigkeitsversuche an Voll- und Lochstäben aus hochfesten Baustählen*. Veröffentlichungen des Institutes für Statik und Stahlbau der TH-Darmstadt, Heft 7, Darmstadt, 1969
- [7] Petersen: *Stahlbau, Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg Verlag, 1993
- [8] Peterson, R.E.: *Stress Concentration Design Factors*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1953 (1956) Zit. in [5] und [6]
- [9] Autorenkollektiv: *Schwingfestigkeit*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973
- [10] *A tentative guide for fatigue and the statistical analysis of fatigue data*. ASTM Special Technical Publication 91 A Zit. in [5]



- [11] Thiele, A., Lohse, W.: *Stahlbau, Teil 2*. B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 1997
- [12] Salmang, H., Scholze, H.: *Keramik, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften*. 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1982
- [13] Sonsino, C.M.: *Schwingfestigkeit von  $Al_2O_3$ -und  $Si_3N_4$ -Keramiken*. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit Darmstadt, 1992
- [14] Munz, D., Fett, T.: *Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe: Versagensablauf, Werkstoffauswahl, Dimensionierung*. Springer Verlag, 1989
- [15] Grathwohl, G.: *Keramik in Wissenschaft und Praxis: Mechanische Eigenschaften keramische Konstruktionswerkstoffe*., DGM Informationsgesellschaft, 1993
- [16] Buxbaum, O., Sonsino, C.M., Esper, F.J.: *Fatigue Design Criteria for Ceramic Components under Cyclic Loading*. Sonderdruck aus INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE 16, 1994, Nr. 4, S. 257-265
- [17] Grathwohl, G.: *Ermüdung von Keramik unter Schwingbeanspruchung*. Zeitschrift: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 19, 1988, S. 113-124
- [18] Dawihl, W., Altmeyer, G., Dörre, E.: *Statische und dynamische Dauerfestigkeit von Aluminiumoxid-Sinterkörpern*. Zeitschrift: Werkstofftechnik 8, 1977, S. 328-330
- [19] Krohn, D.A., Hasselman, D.P.H.: *Static and Cyclic Fatigue Behavior of a Polycrystalline Alumina*. Journal of The American Ceramic Society, Vol. 55, No. 4, 1972, S. 208-211
- [20] Wörner, J.-D., Schneider, J., Fink, A.: *Glasbau: Grundlagen, Berechnungen, Konstruktionen*. Springer Verlag, 2001
- [21] vpi: *Glaskonstruktionen im Bauwesen: Empfehlungen für die Bemessung und Konstruktion von Glas im Bauwesen*. Entwurf 2/01
- [22] Fink, A.: Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen. Dissertation, Institut für Statik, TU-Darmstadt, 2000

## **Anhang**

## Tabellen

**Tabelle 1:** Chemische Zusammensetzung von MR-St 37-2; aus [5]

| C    | Si   | Mn   | P     | S     |
|------|------|------|-------|-------|
| 0,11 | 0,22 | 0,41 | 0,024 | 0,034 |

**Tabelle 2:** Chemische Zusammensetzung der hochfesten Baustähle; aus [6]

|             | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Ni   | V    | Mo   |
|-------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| N-A-XTRA 70 | 0,17 | 0,67 | 0,83 | 0,017 | 0,018 | 1,00 | 0,35 |      |      |
| HSB 77V     | 0,12 | 0,33 | 1,18 | 0,013 | 0,013 | 0,52 | 1,24 | 0,09 | 0,26 |
| HSB 55C     | 0,14 | 0,34 | 1,40 | 0,010 | 0,010 | 0,57 | 0,66 | 0,12 |      |

**Tabelle 3:** Chemische Zusammensetzung und Pulverherstellung der Keramik-Werkstoffe; aus [13]

| Werkstoffe                     |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    |                                      |                               |  | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>           |       |
|--------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------|--|--|-------|
|                                |                                | Rundproben  | Flachproben                          |                               |  |  |       |
|                                |                                |   | SG                                   | TV 1863                       | B7 (PVA bzw. PVB)                              | 9005 sgt                                 | I     |
| Anorganische Bestandteile in % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Hauptbestandteil                                  | 96,15                                | 96,15                         | 99,99  | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>           | 89,50 |
|                                | CaO                            | Nebenbestandteil                                  | —                                    | —                             | —  | Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 4,95  |
|                                | BaO                            | —   | 2,15                                 | 2,15                          | —  | Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 4,55  |
|                                | SiO <sub>2</sub>               | Nebenbestandteil                                  | 1,70                                 | 1,70                          | —  | BaO                                      | 0,99  |
|                                |                                |   |                                      |                               |  | TiO <sub>2</sub>                         | 0,10  |
| organische Additive in %       |                                | keine Angaben                                     | 0,75                                 | 1,00                          | 1,20   | 1,00                                     |       |
| Art der Additive               |                                | keine Angaben                                     | 0,50% Wachs, 0,25% Ca-Ligninsulfonat | Polyvinylalkohol bzw. butyral | 0,50% PVA 0,50% Polyeth. 0,20% Polycarbonsäure | Polyvinylbutyral                         |       |
| Pulverherstellung              |                                | in Kugelmühle gemahlen, Schlicker sprühgetrocknet | gemahlen, gefriergetrocknet          | attritiert, Sol-Gel gefällt   | gemahlen, sprühgetrock. gefriergetrock.        | attritiert, im Trockenschrank getrocknet |       |
| Korngröße der Pulver in µm     | D (10%)                        | < 1   | 0,33                                 | 0,38                          | 0,28   | 0,29                                     |       |
|                                | D (50%)                        | < 4   | 0,87                                 | 0,89                          | 0,73   | 0,79                                     |       |
|                                | D (90%)                        | < 10  | 3,40                                 | 3,50                          | 2,40   | 2,70                                     |       |

**Tabelle 4:** Chemische Zusammensetzung von Silicatgläsern; aus [20]

| Bestandteil                          | Kalk-Natron-Silicatglas | Borosilicatglas |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>                     | 69% - 74%               | 79% - 87%       |
| CaO                                  | 5% - 12%                | ---             |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | ---                     | 7% - 15%        |
| Na <sub>2</sub> O / K <sub>2</sub> O | 12% - 16%               | 0% - 16%        |
| MgO                                  | 0% - 6%                 | ---             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 0% - 3%                 | 0% - 8%         |

**Tabelle 5:** Auflistung der Einstufen-Dauerversuche an den St 37-Vollstäben mit Walzhaut; aus[5]

| $\kappa = \sigma_u / \sigma_o$ | Probenzustand                                     | $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Probenzahl |
|--------------------------------|---|-------------------------------|------------|
| $\kappa = -1$                  | geglüht 650°C/h<br>Walzhaut                       | 175                           | 1          |
|                                |   | 185                           | 2          |
|                                |   | 190                           | 2          |
|                                |   | 200                           | 2          |
|                                | Normalisiert<br>Walzhaut                          | 165                           | 1          |
|                                |   | 175                           | 2          |
|                                |   | 180                           | 2          |
|                                |   | 185                           | 2          |
|                                |   | 195                           | 2          |
|                                |   | 210                           | 1          |
|                                | nicht geglüht, in Probenlängsrichtung geschliffen | 210                           | 1          |
|                                |   | 220                           | 2          |
|                                | geschliffen, danach<br>normalisiert               | 185                           | 3          |
|                                |   | 195                           | 1          |
|                                |   | 210                           | 1          |
|                                | normalisiert, danach<br>geschliffen               | 170                           | 3          |
|                                |   | 180                           | 1          |
|                                |   | 200                           | 1          |
|                                | Anlieferungszustand<br>Walzhaut                   | 210                           | 17         |
|                                |   | 220                           | 2          |
|                                |   | 230                           | 14         |
|                                |   | 250                           | 7          |
| $\kappa = 0$                   | geglüht 650°C/h<br>Walzhaut                       | 280                           | 1          |
|                                |   | 295                           | 1          |
|                                |   | 310                           | 3          |
|                                |   | 330                           | 3          |
|                                |   | 330                           | 3          |
|                                | Normalisiert<br>Walzhaut                          | 260                           | 3          |
|                                |   | 270                           | 2          |
|                                |   | 280                           | 2          |
|                                |   | 300                           | 1          |
|                                |   | 300                           | 1          |
|                                | Anlieferungszustand<br>Walzhaut                   | 310                           | 11         |
|                                |   | 320                           | 8          |
|                                |   | 330                           | 11         |
|                                |   | 350                           | 13         |
|                                |   | 360                           | 1          |
|                                |   | 370                           | 14         |
|                                |   | 390                           | 10         |

**Tabelle 6:** St 37-Vollstab mit Walzhaut, spannungsfrei gegläht (650°C/h),  $\kappa = -1$ ; aus [5]

| Stab-Nr. | $A_0$<br>[cm <sup>2</sup> ] | max F<br>[t]              | max $\sigma$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Lastspiele<br>[N/10 <sup>6</sup> ] | Abstand a<br>[cm] | $A_0/A_{Br}$ | max $\sigma_{Br}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------|---|
| 302      | 5,54                        | $\pm 9,70$<br>$\pm 11,78$ | $\pm 175$<br>$\pm 210$               | 8,104<br>0,554                     | -2,1              | 0,979        | 205,8                                     |
| 310      | 5,52                        | 9,94<br>11,76             | 185<br>210                           | 8,111<br>0,167                     | -1,0              | 0,991        | 208                                       |
| 238      | 5,55                        | 10,54                     | 190                                  | 1,332                              | -1,4              | 0,988        | 187,8                                     |
| 143      | 5,52                        | 10,49                     | 190                                  | 4,530                              | -0,6              | 0,995        | 189                                       |
| 52       | 5,56                        | 11,12                     | 200                                  | 0,452                              | +0,1              | 0,999        | 199,8                                     |
| 286      | 5,58                        | 10,04<br>11,16            | 185<br>200                           | 0,243<br>1,918                     | -1,0              | 0,991        | 198,2                                     |
| 90       | 5,59                        | 11,18<br>12,60            | 200<br>220                           | 5,562<br>0,045                     | +2,4              | 0,971        | 214                                       |

Die Stabnummern 238, 286 und 90 wurden statisch auseinandergezogen. Ihre Reißfestigkeit betrug  $\sigma_R = 260 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_R = 351 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_R = 438 \text{ N/mm}^2$ . Die Proben mit der Stabnummer 302 und 310 wurden auf einem höheren Spannungshorizont durch Schwingungsbeanspruchung zu Bruch gebracht.

**Tabelle 7:** Bestimmung der Zeitfestigkeit bei  $2,2 \cdot 10^6$  Lastspielen nach den Treppenstufenverfahren, Stufenabstand  $d = 2,5 \text{ N/mm}^2$ , aus [6]

| Numer der Spannungsstufe | Spannungsamplitude $\pm \sigma_a$ (kp/cm <sup>2</sup> ) | Nach $2,2 \cdot 10^6$ Lastspielen gingen von 20 nacheinander untersuchten Proben | Anzahl der auf der jeweiligen Spannungsstufe<br>gebrochen   nicht gebr.<br>Proben |   | Ereignishäufigkeit (Bruch) |               |                 |
|--------------------------|---|--|---|---|----------------------------|---------------|-----------------|
| i                        | $x_i$   | zu Bruch ○      nicht zu Bruch ●   | r   | L | $f_i$                      | $i \cdot f_i$ | $i^2 \cdot f_i$ |
| 7                        | 18.00   | ○  | 1   |   | 1                          | 7             | 49              |
| 6                        | 17.75   | ○ ●  | 3   | 1 | 3                          | 18            | 108             |
| 5                        | 17.50   | ○ ●  | 2   | 2 | 2                          | 10            | 50              |
| 4                        | 17.25   | ○ ●  | 2   | 1 | 2                          | 8             | 32              |
| 3                        | 17.00   | ○ ●  | 3   | 1 | 3                          | 9             | 27              |
| 2                        | 16.75   | ○ ●  | 1   | 1 | 1                          | 2             | 4               |
| 1                        | 16.50   | ○ ●  | 1   | 1 | 1                          | 1             | 1               |
| 0                        | 16.25   | ○ ●  |   | 1 |                            |               |                 |
|                          |   |  | 13  | 8 | F=13                       | A=55          | B=271           |

Mittelwert  $m = x_0 + d \left( \frac{A}{F} - \frac{1}{2} \right) = \pm 17.18 \text{ kp/mm}^2$   
 Standardabweichung  $s = 1.620 \cdot d \left( \frac{F \cdot B - A^2}{F^2} + 0.029 \right) = \pm 1.19 \text{ kp/mm}^2$   
 Kontrolle, ob Bedingung für die Gültigkeit der Formel für s erfüllt ist  
 $\frac{F \cdot B - A^2}{F^2}$  muß  $> 0.30$  sein  $= \frac{F \cdot B - A^2}{F^2} = 2.93$   
 Überlebenswahrscheinlichkeit  
 $P_{\bar{u}} = 90 \text{ v.H.} = m - s \cdot 1.28 \hat{=} 15.66 \text{ kp/mm}^2$   
 $P_u = 10 \text{ v.H.} = m + s \cdot 1.28 \hat{=} 18.70 \text{ kp/mm}^2$

**Tabelle 8:** HSB 77V, Vollstab mit Walzhaut,  $\kappa = 0$ ; aus [6]

| Stab-Nr. | $A_0$<br>[cm <sup>2</sup> ] | max F<br>[Mp] | max $\sigma$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Lastspiele<br>[N/10 <sup>6</sup> ] | Abstand a<br>[cm] | $A_0/A_{Br}$ | max $\sigma_{Br}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------|-----------------------------|---------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------|---|
| 7.12     | 5,63                        | 42,30         | 750                                  | 0,0475                             | 0                 | 1            | 750                                       |
| 7.13     | 5,61                        | 42,10         | 750                                  | 0,0802                             | -0,4              | 0,995        | 746                                       |
| 8.2      | 5,60                        | 42,00         | 750                                  | 0,0576                             | -2,0              | 0,974        | 731                                       |
| 5.8      | 5,62                        | 42,20         | 750                                  | 0,0509                             | +7,0              | 0,819        | 614                                       |
| 6.8      | 5,50                        | 41,30         | 750                                  | 0,0737                             | -1,2              | 0,982        | 736                                       |
| 10.2     | 5,56                        | 41,70         | 750                                  | 0,0554                             | -1,0              | 0,994        | 745                                       |
| 11.4     | 5,64                        | 42,30         | 750                                  | 0,0516                             | 0                 | 1            | 750                                       |

**Tabelle 9:** Fertigungsbedingungen und mittlere Dichten; aus [13]

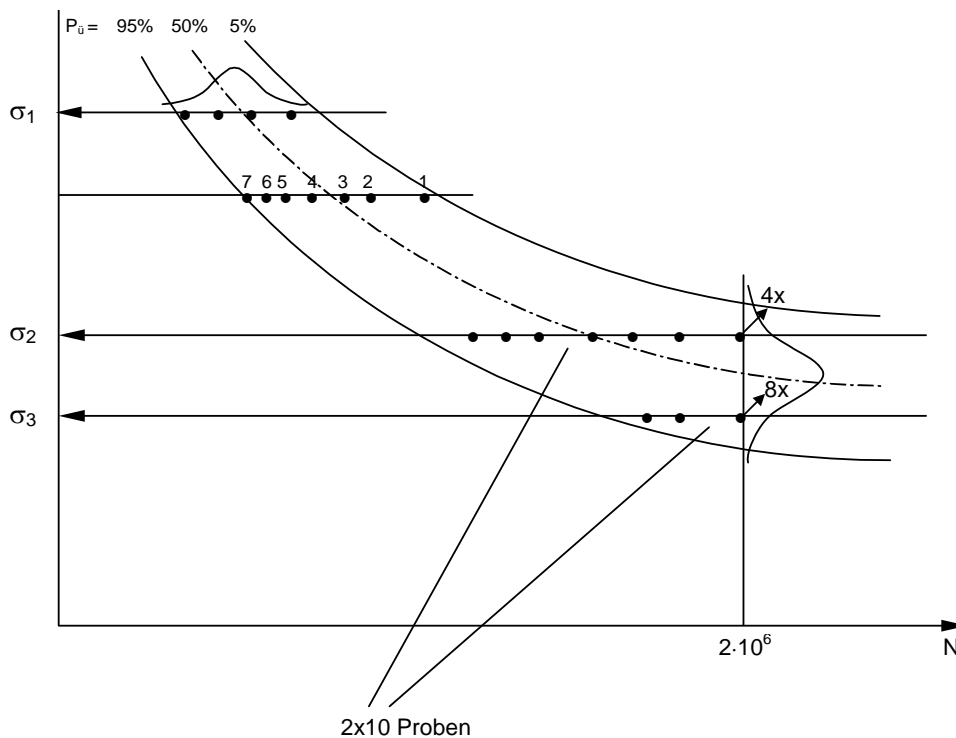
| Werkstoffe  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                   |                   |                   |                   | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> |                                      |
|---|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
|   | Rundproben                     | Flachproben       |                   |                   |                   |                                |                                      |
|   | SG                             | SG                | TV 1863           | B7 (PVA bzw. PVB) | 9005 sgt          | I                              | II                                   |
| Pressdruck in bar   | 300 <sup>1)</sup>              | 600 <sup>2)</sup> | 600 <sup>2)</sup> | 600 <sup>2)</sup> | 600 <sup>2)</sup> | 600 <sup>2)</sup>              |                                      |
| Pressdruck <sup>3)</sup> in bar   | —                              | 2000              | 2000              | 2000              | 2000              | 2000                           |                                      |
| Glühen <sup>4)</sup> in h/°C  | 1/700                          | 1/600             | 1/600             | 1/600             | 1/600             | 1/450                          |                                      |
| Sintern <sup>5)</sup> in h/°C   | 2/1580                         | 2/1580            | 1/1600            | 1/1600            | 1/1600            | 2/1900                         | 2/1900 + 10min/<br>1900, 1000bar hip |
| Dichte in g/cm <sup>3</sup>   | 3,70                           | 3,73              | 3,89              | 3,94              | 3,95              | 3,16                           | 3,15                                 |
| Biegebruchfestigkeit<br>R <sub>B</sub> in MPa   | 340 <sup>6)</sup>              | 372 <sup>7)</sup> | 434 <sup>7)</sup> | 411 <sup>7)</sup> | 467 <sup>7)</sup> | 451 <sup>7)</sup>              | 455 <sup>7)</sup>                    |
| <div><div><sup>1)</sup> quasiisostatisch<br/>im Preßsack</div><div><sup>2)</sup> uniaxial<br/>in Luft</div><div><sup>3)</sup> isostatisch<br/>im Preßsack</div><div><sup>4)</sup> in Luft</div><div><sup>5)</sup> in Luft, nur<br/>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in N<sub>2</sub></div><div><sup>6)</sup> Kerbspannung<br/>für α<sub>kb</sub> = 1,08</div><div><sup>7)</sup> Kerbspannung<br/>für α<sub>kb</sub> = 1,77</div></div> |                                |                   |                   |                   |                   |                                |                                      |

**Tabelle 10:** Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche mit Keramikproben aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; aus [13]

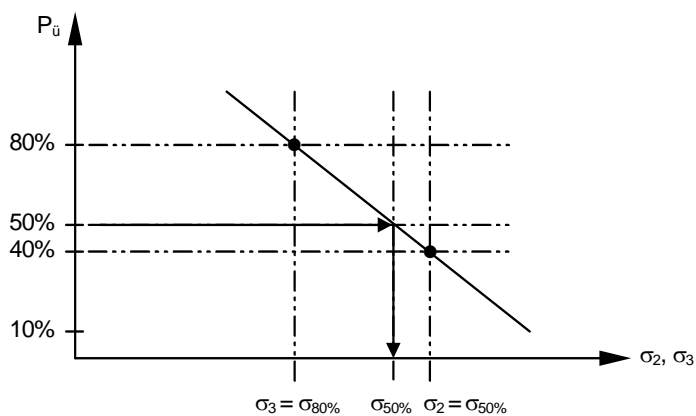
| Proben-<br>nummer | Versuchs-<br>temp. | Nenndurch-<br>messer | Widerst.-<br>moment      | Spannungs-<br>amplitude | Last-<br>amplitude | Spannungs-<br>verhältnis  | Hebelarm | Nennbiege-<br>moment | Nenn-<br>spannung    | Formzahl | Kerb-<br>spannung    | Last-<br>frequenz | Schwing-<br>spielzahl |
|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|----------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|-------------------|-----------------------|
|                   | T in °C            | D in mm              | $W_b$ in mm <sup>3</sup> | $U_a$ in mV             | $F_a$ in N         | $R = \sigma_u / \sigma_o$ | a in mm  | $M_b$ in Nmm         | $\sigma_{an}$ in MPa | $a_{kb}$ | $\sigma_{a0}$ in MPa | f in Hz           | $N_B$                 |
| 1                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 650                     | 1300               | -1                        | 25.0     | 16250                | 161                  | 1.08     | 174                  | 20                | $2.01 \cdot 10^6$ »   |
| -                 | -                  | -                    | -                        | 920                     | 1840               | -1                        | 25.0     | 23000                | 228                  | 1.08     | 246                  | 20                | $1.80 \cdot 10^4$     |
| 2                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 920                     | 1840               | -1                        | 25.0     | 23000                | 228                  | 1.08     | 246                  | 20                | $5.90 \cdot 10^2$     |
| 3                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 730                     | 1460               | -1                        | 25.0     | 18250                | 181                  | 1.08     | 195                  | 20                | $1.02 \cdot 10^5$     |
| 4                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 730                     | 1460               | -1                        | 25.0     | 18250                | 181                  | 1.08     | 195                  | 20                | $1.18 \cdot 10^5$     |
| 5                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 730                     | 1460               | -1                        | 25.0     | 18250                | 181                  | 1.08     | 195                  | 20                | $2.63 \cdot 10^6$ »   |
| -                 | -                  | -                    | -                        | 920                     | 1840               | -1                        | 25.0     | 23000                | 228                  | 1.08     | 246                  | 20                | $1.33 \cdot 10^4$     |
| 6                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 730                     | 1460               | -1                        | 25.0     | 18250                | 181                  | 1.08     | 195                  | 20                | $4.45 \cdot 10^4$     |
| 7                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 730                     | 1460               | -1                        | 25.0     | 18250                | 181                  | 1.08     | 195                  | 20                | $5.08 \cdot 10^4$     |
| 8                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 910                     | 1820               | -1                        | 25.0     | 22750                | 225                  | 1.08     | 243                  | 20                | $1.00 \cdot 10^3$     |
| 9                 | 20                 | 10.20                | 101                      | 910                     | 1820               | -1                        | 25.0     | 22750                | 225                  | 1.08     | 243                  | 20                | $7.00 \cdot 10^2$     |
| 10                | 20                 | 10.20                | 101                      | 910                     | 1820               | -1                        | 25.0     | 22750                | 225                  | 1.08     | 243                  | 20                | $4.90 \cdot 10^3$     |
| 12                | 20                 | 10.20                | 101                      | 910                     | 1820               | -1                        | 25.0     | 22750                | 225                  | 1.08     | 243                  | 20                | $6.70 \cdot 10^3$     |
| 13                | 20                 | 10.20                | 101                      | 805                     | 1610               | -1                        | 25.0     | 20125                | 199                  | 1.08     | 215                  | 20                | $2.46 \cdot 10^4$     |
| 14                | 20                 | 10.20                | 101                      | 805                     | 1610               | -1                        | 25.0     | 20125                | 199                  | 1.08     | 215                  | 20                | $1.74 \cdot 10^4$     |
| 15                | 20                 | 10.20                | 101                      | 805                     | 1610               | -1                        | 25.0     | 20125                | 199                  | 1.08     | 215                  | 20                | $5.81 \cdot 10^4$     |
| 16                | 20                 | 10.20                | 101                      | 635                     | 1270               | -1                        | 25.0     | 15875                | 157                  | 1.08     | 170                  | 20                | $4.04 \cdot 10^5$     |
| 17                | 20                 | 10.20                | 101                      | 635                     | 1270               | -1                        | 25.0     | 15875                | 157                  | 1.08     | 170                  | 20                | $3.41 \cdot 10^6$ »   |
| -                 | -                  | -                    | -                        | 810                     | 1620               | -1                        | 25.0     | 20250                | 200                  | 1.08     | 217                  | 20                | $4.00 \cdot 10^3$     |

## Abbildungen

Die Abbildungen sind Quellen entnommen, die auch gekerbte Proben behandeln. Die Ergebnisse dieser gekerbten Proben sind teilweise zusammen mit den ungekerbten Proben in den Abbildungen dargestellt, sollen aber im Rahmen dieser Vertieferarbeit nicht berücksichtigt werden. (Abbildungen 37, 38, 40, 41, 43 und 44)



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der Streuung einer Wöhlerlinie



**Abbildung 2:** Gauß'sches Wahrscheinlichkeitsnetz



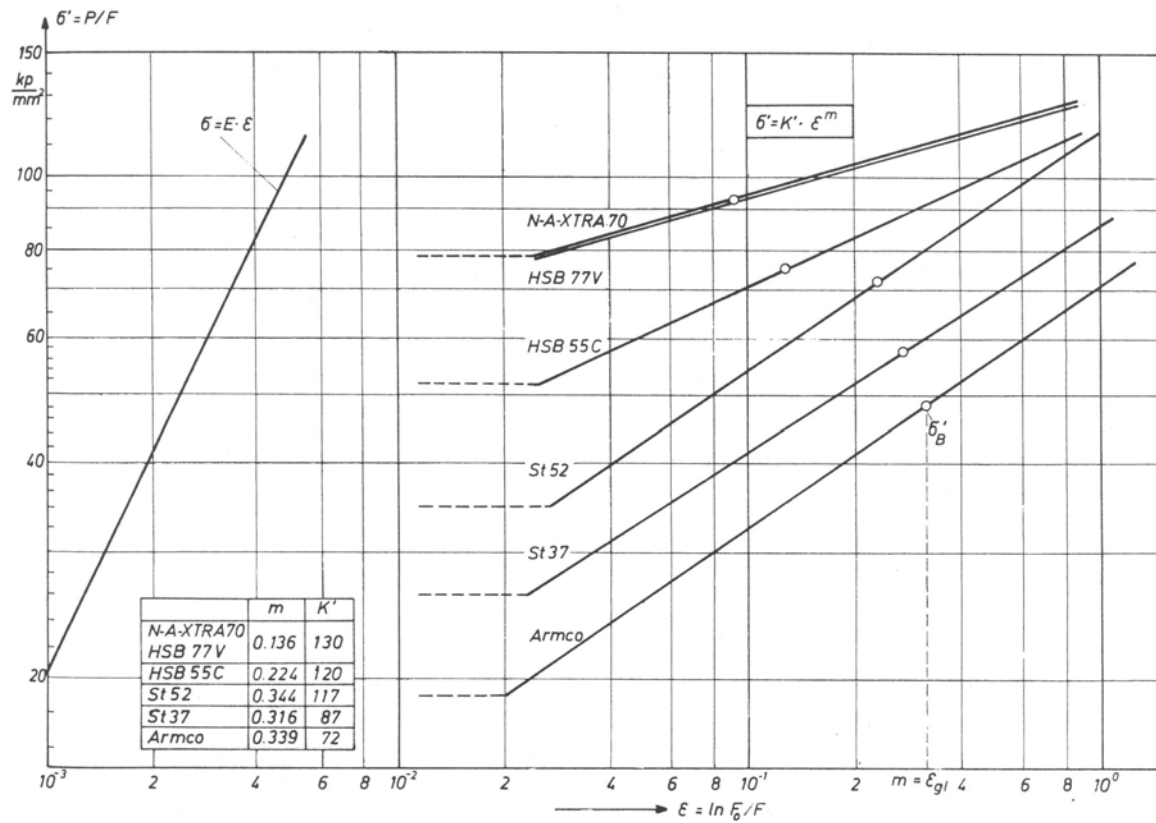


Abbildung 3: Spannungs-Dehnungs-Verläufe; aus [6]

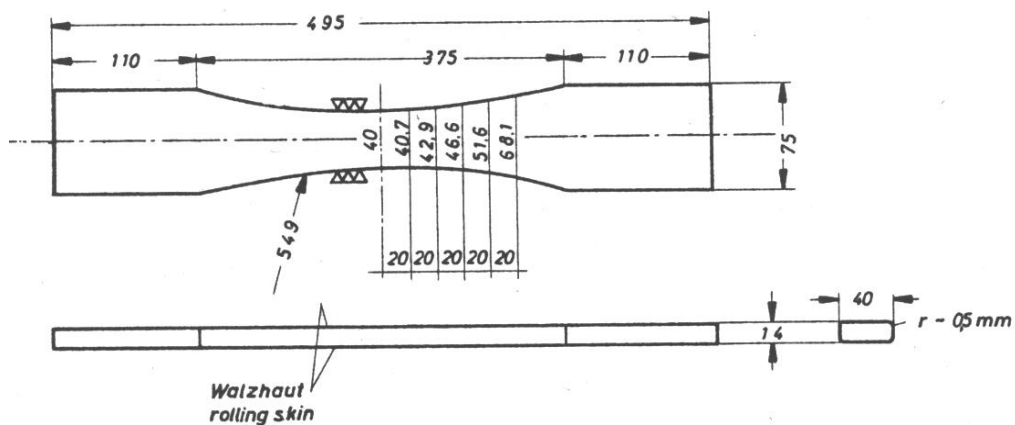


Abbildung 4: Probenabmessungen St 37; aus [5]

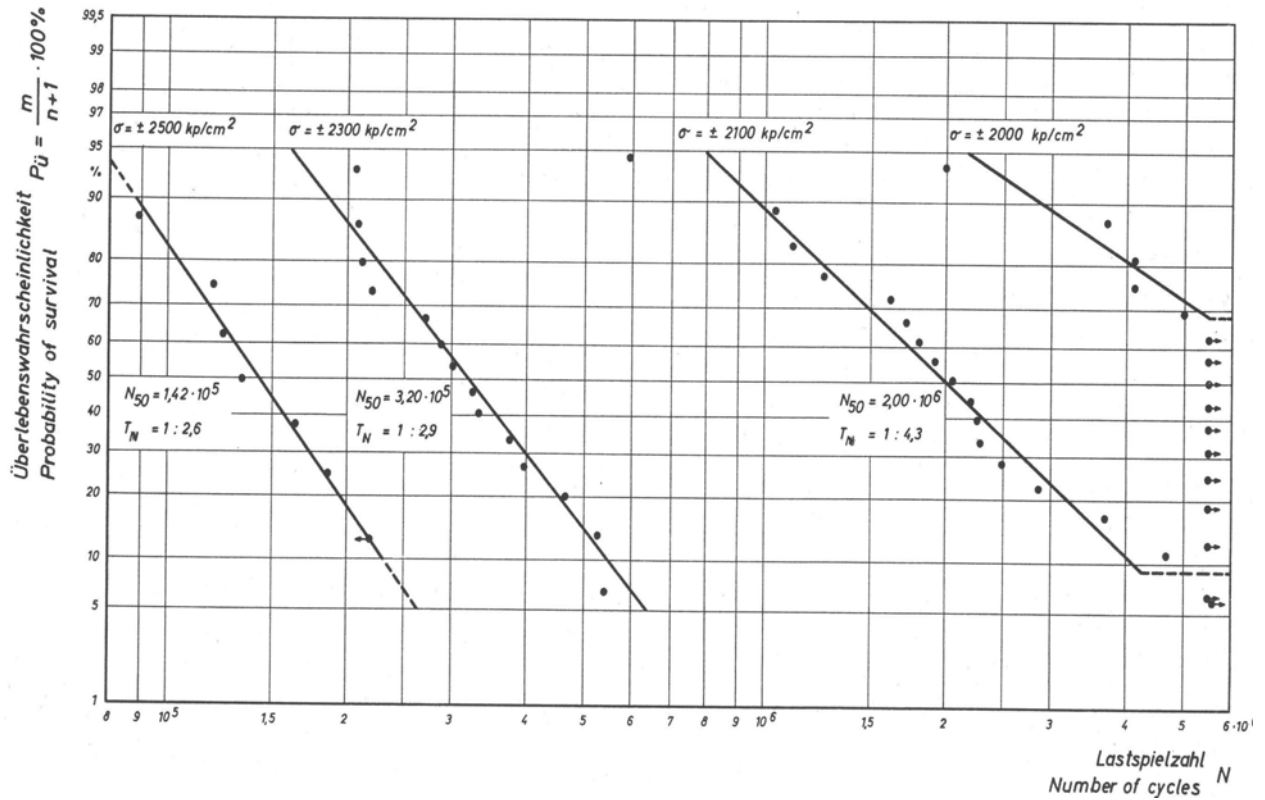


Abbildung 5: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = -1$  mit Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]

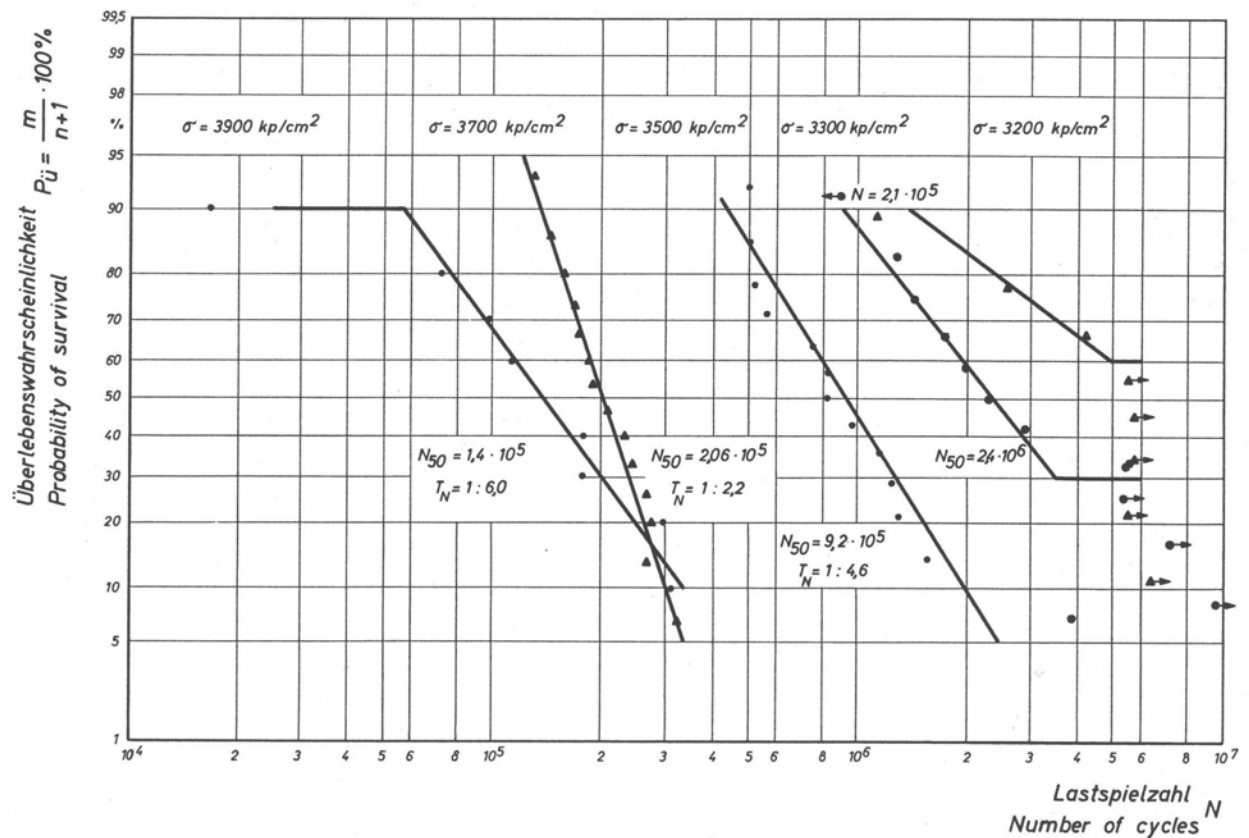


Abbildung 6: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = 0$  mit Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]

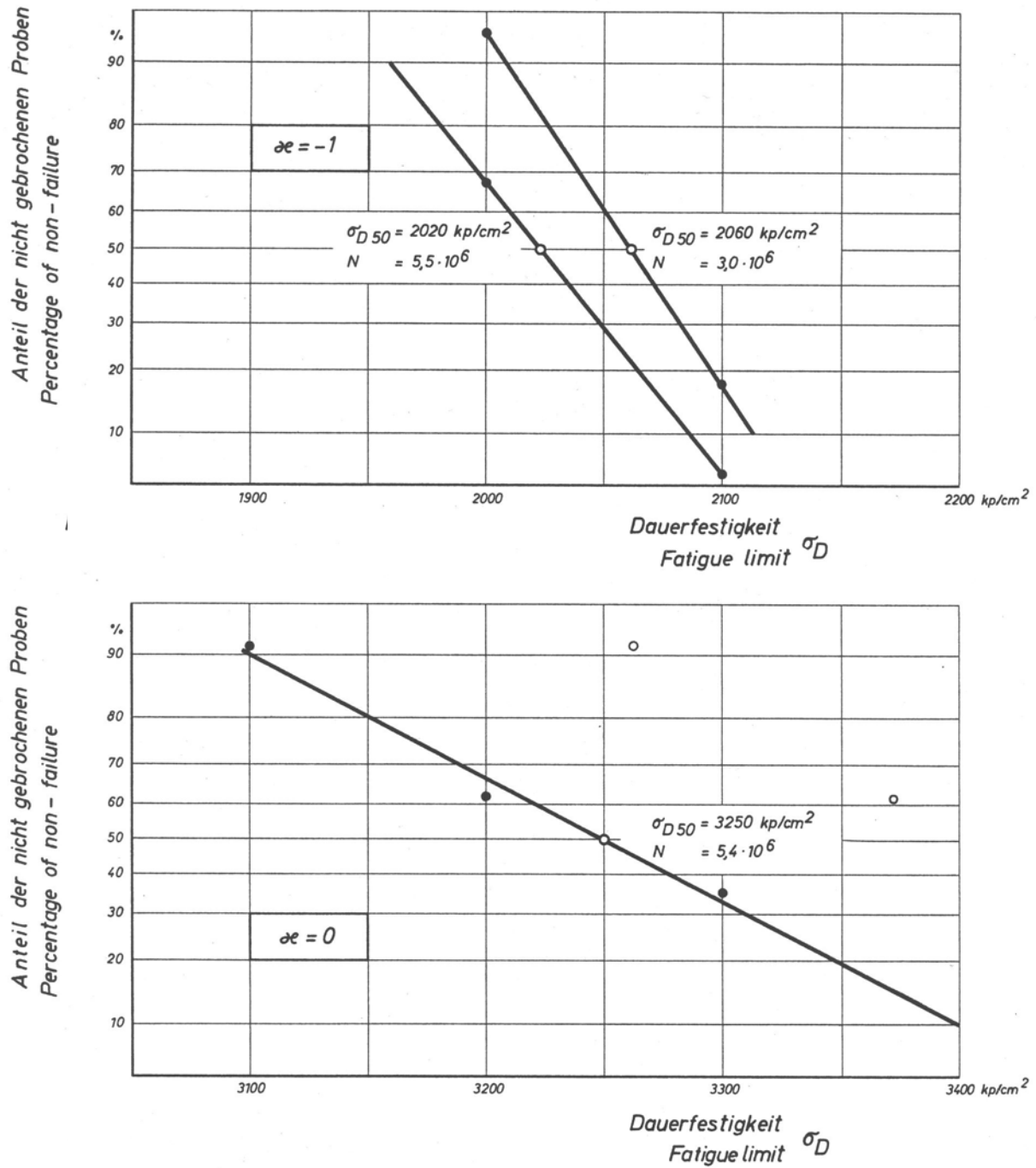


Abbildung 7: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = -1$  und  $\kappa = 0$  mit Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]

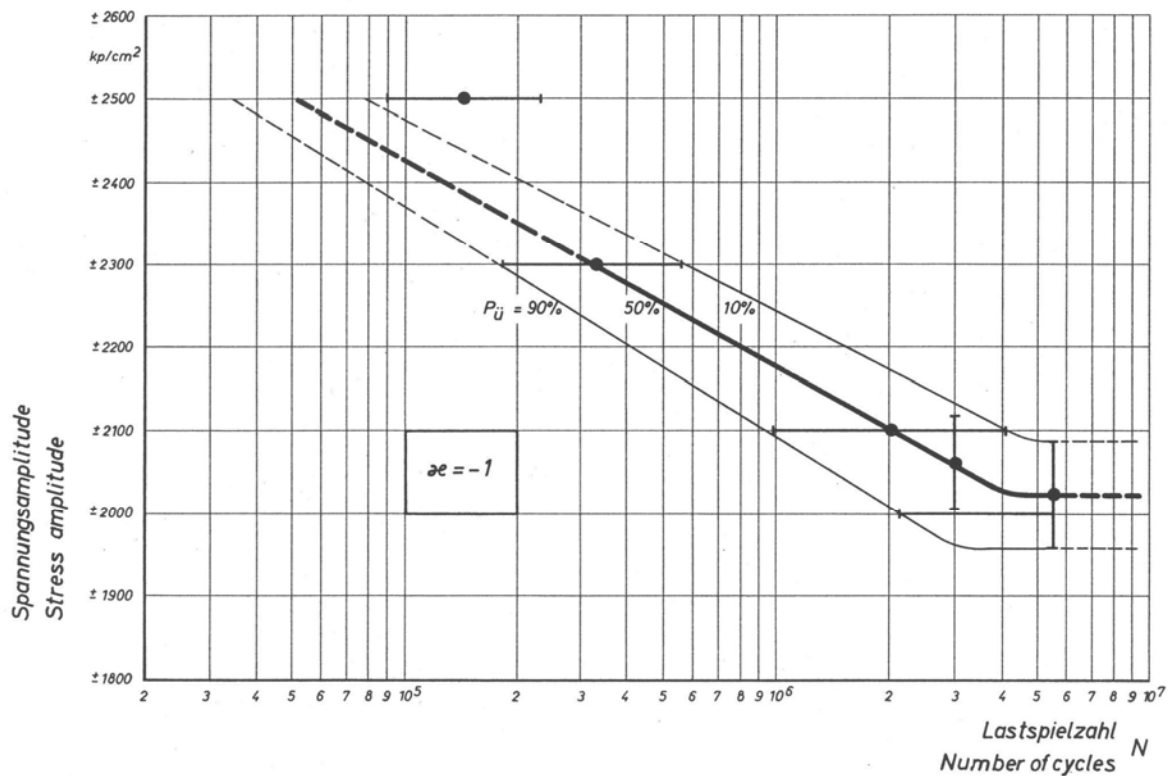


Abbildung 8: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = -1$  mit Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]

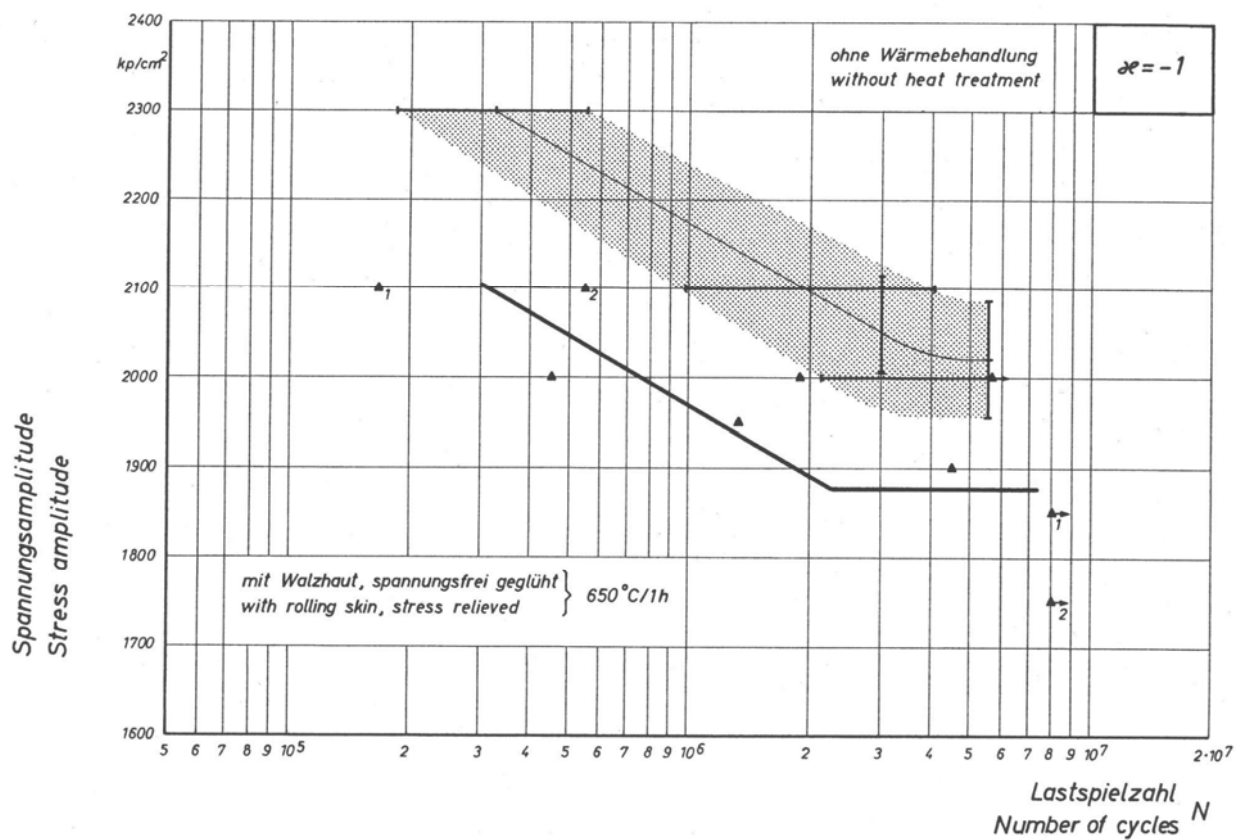


Abbildung 9: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = -1$  mit geglühten und ungeglühten Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]

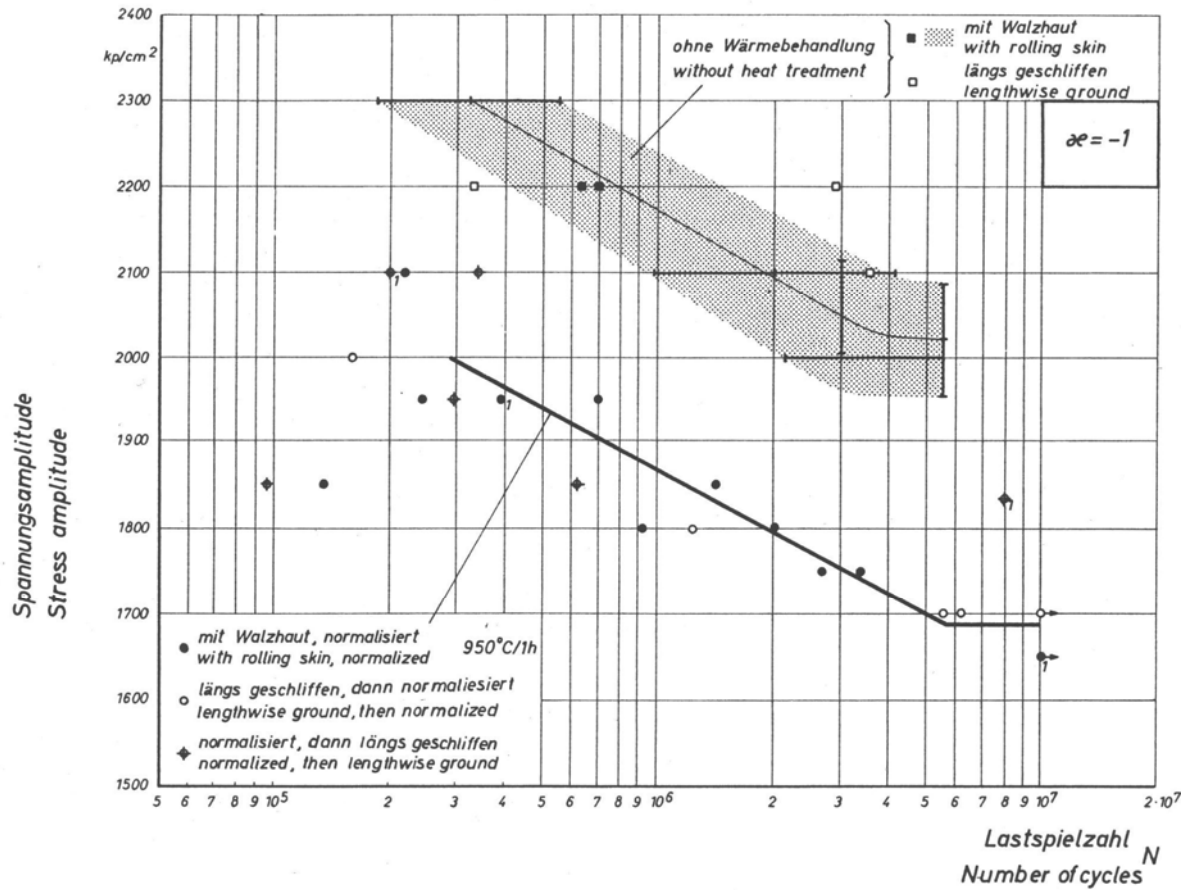


Abbildung 10: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = -1$  mit geglihten und ungeglihten Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]

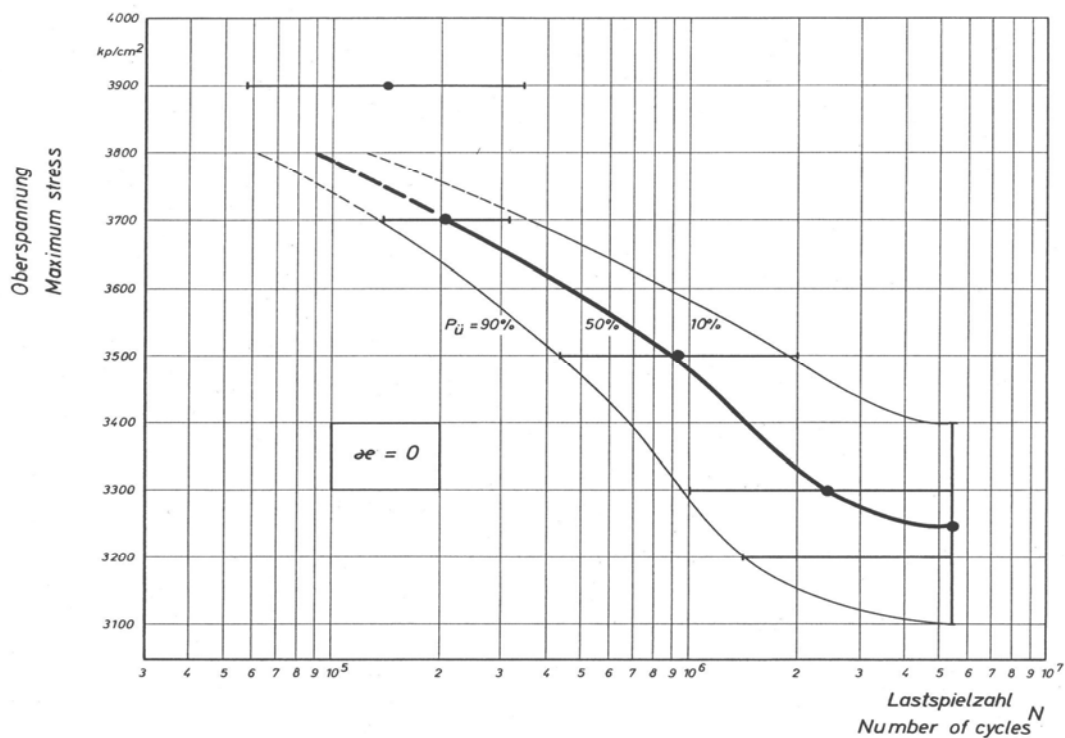
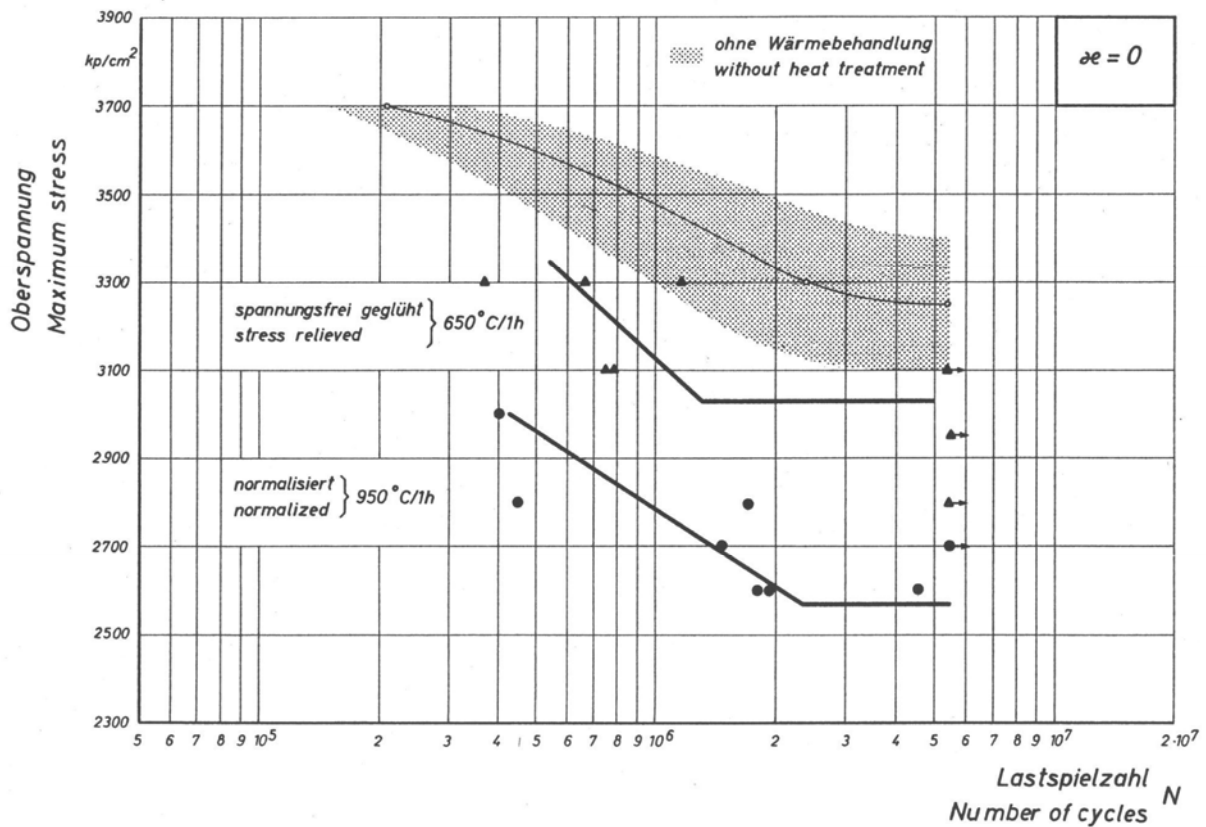
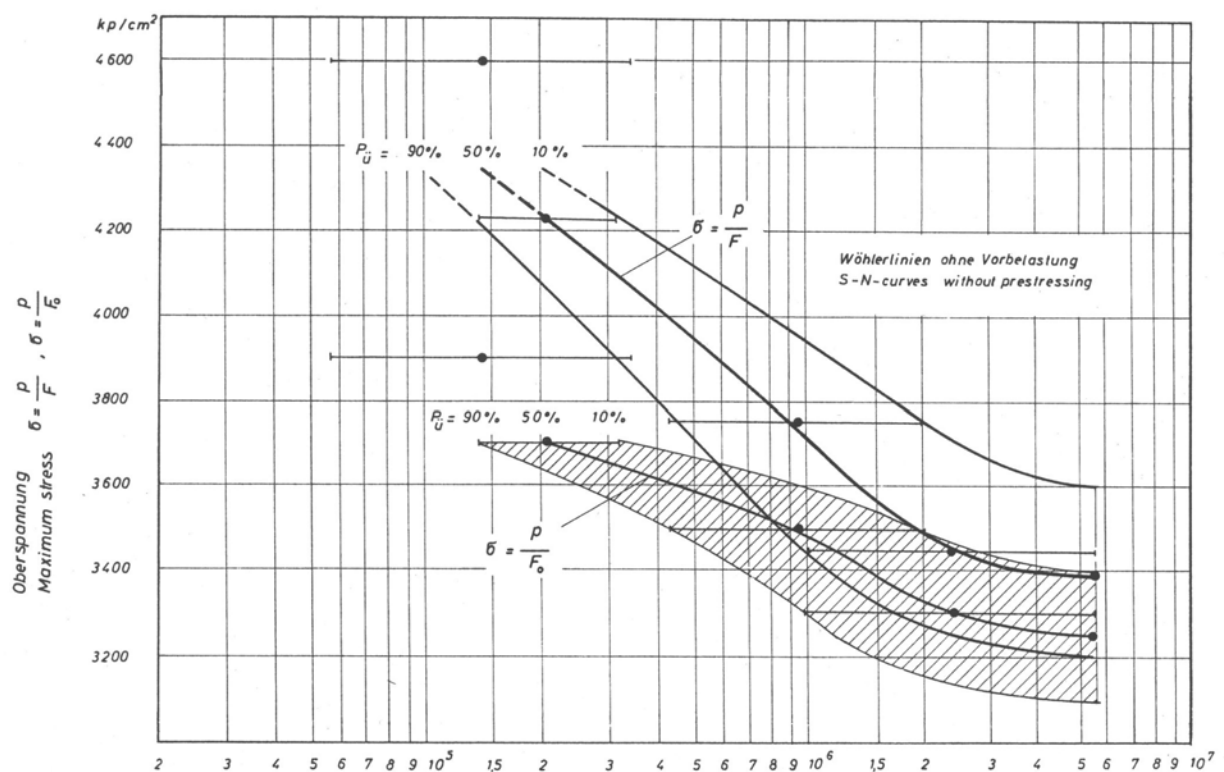


Abbildung 11: Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = 0$  mit Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]



**Abbildung 12:** Einstufen-Dauerversuche bei  $\kappa = 0$  mit geglähten und ungeglähten Vollstäben aus St 37 mit Walzhaut; aus [5]



**Abbildung 13:** Vergleich zwischen effektiven Spannungen  $\sigma = P/F$  und Nennspannungen  $\sigma = P/F_0$  bei Einstufen-Dauerversuchen ( $\kappa = 0$ ) an Vollstäben (St 37) mit Walzhaut; aus [5]

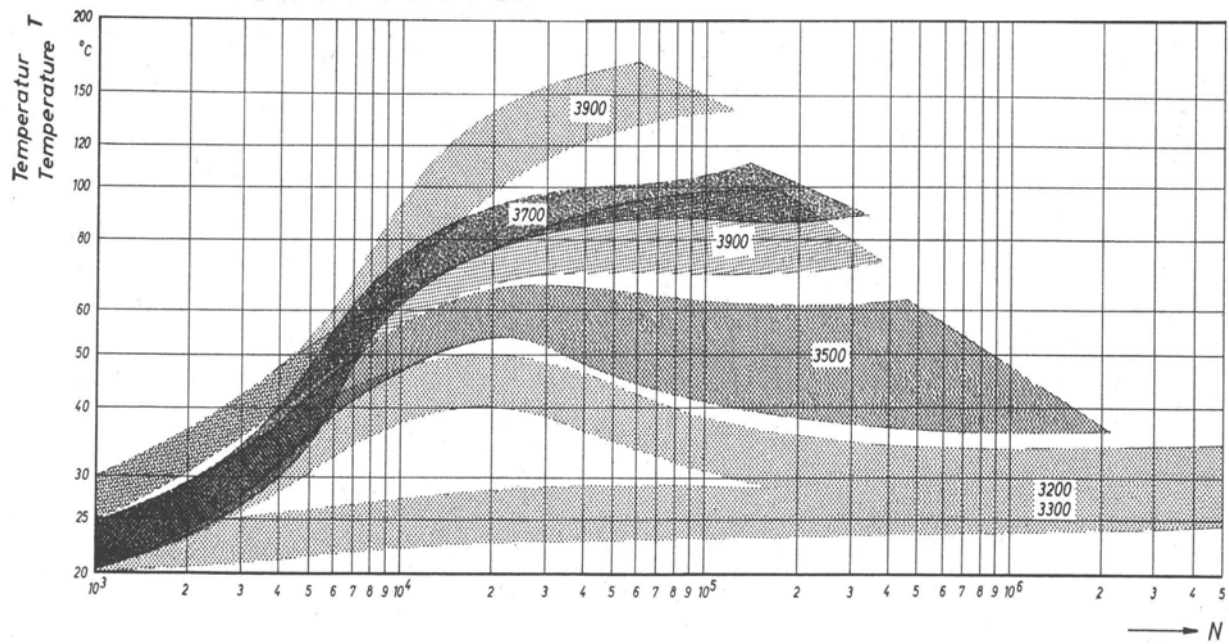


Abbildung 14: Zeit-Temperatur-Kurven für dauerbelastete Vollstäbe aus St 37, Einstufenversuche bei  $\kappa = 0$ ; aus [5]

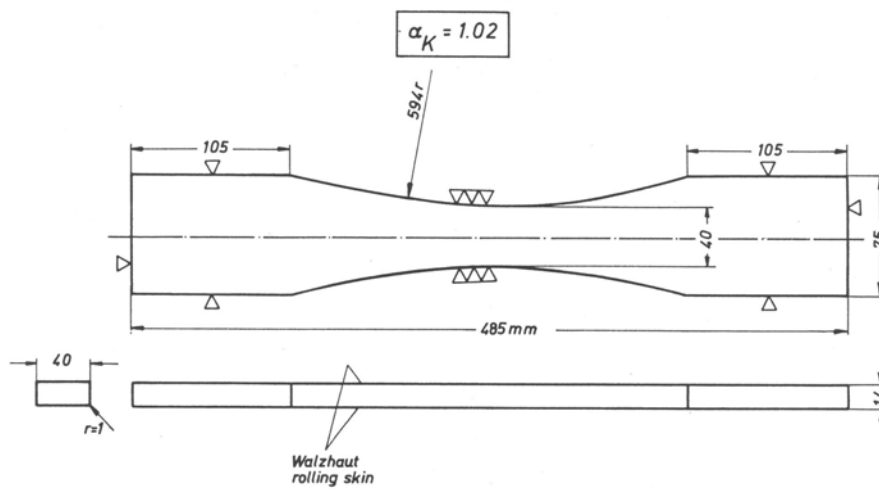


Abbildung 15: Probenabmessungen HSB 77V und HSB 55C; aus [6]

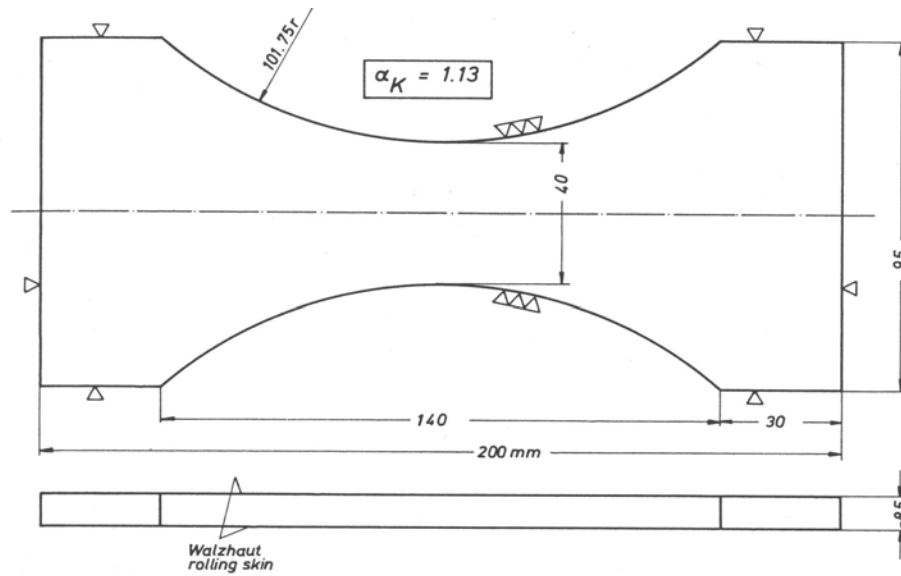


Abbildung 16: Probenabmessungen N-A-XTRA 70; aus [6]

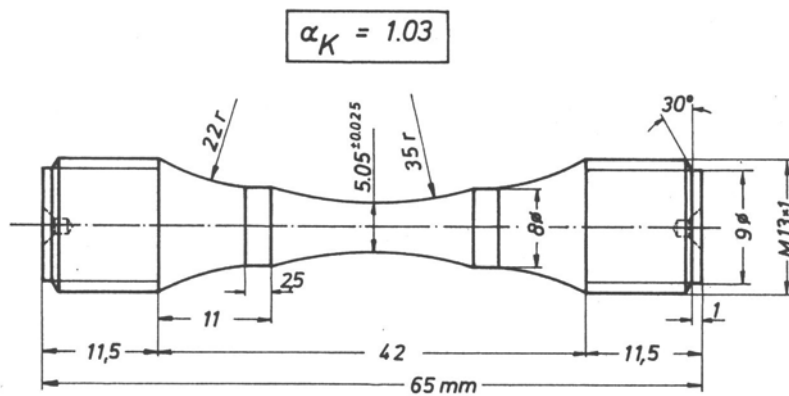


Abbildung 17: Abmessungen der Rundproben aus HSB 77V; aus [6]



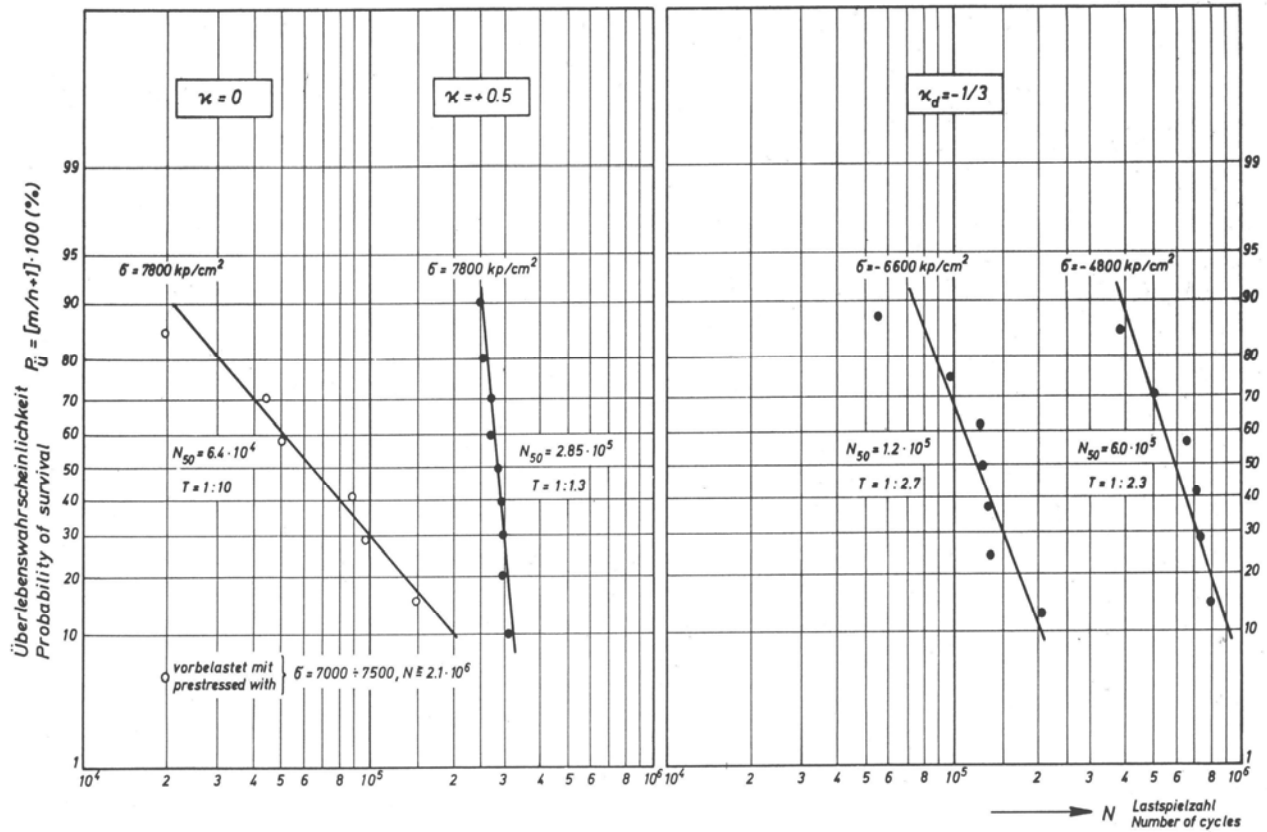


Abbildung 18: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 77V mit Walzhaut; aus [6]

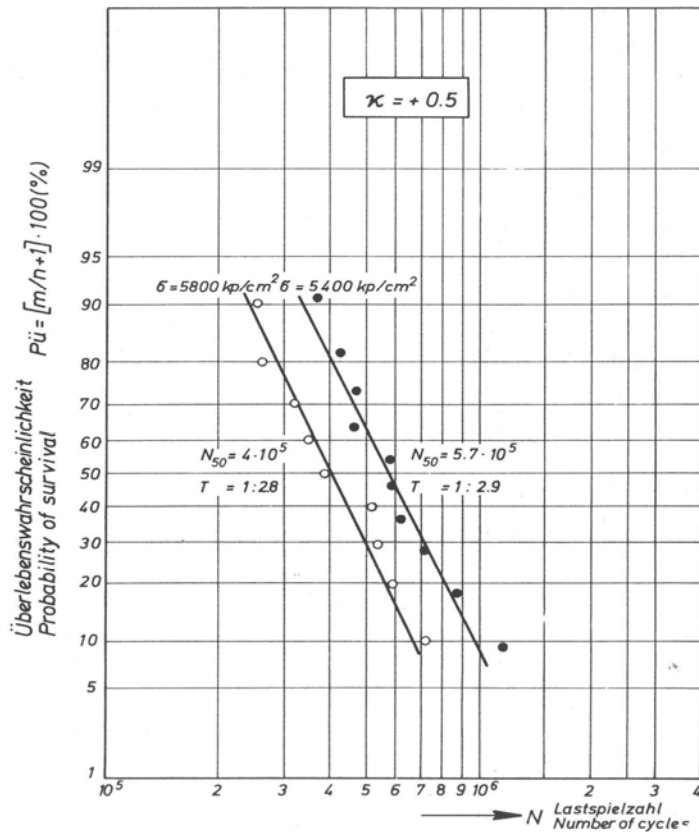


Abbildung 19: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 55C mit Walzhaut; aus [6]

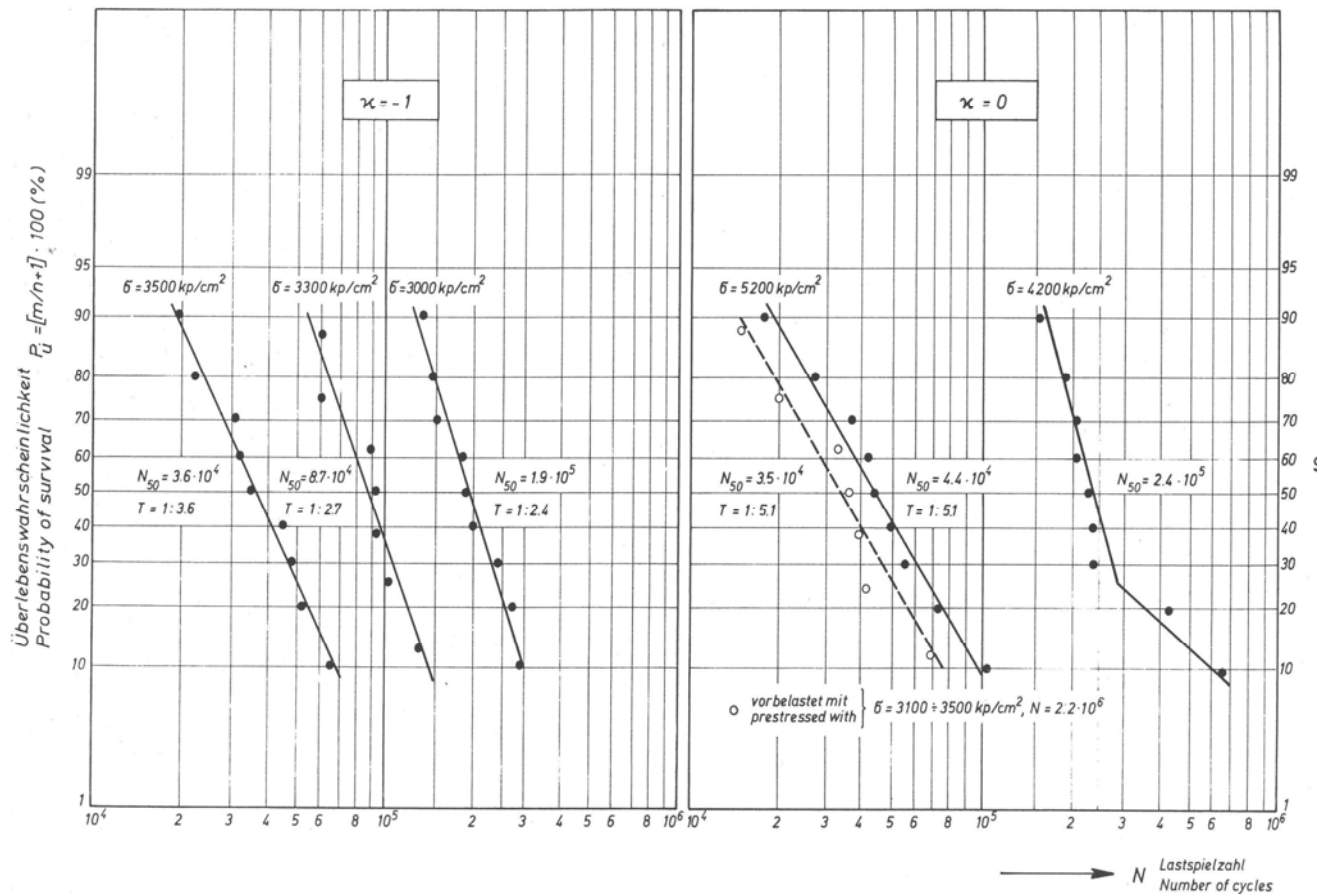


Abbildung 20: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 55C mit Walzhaut; aus [6]

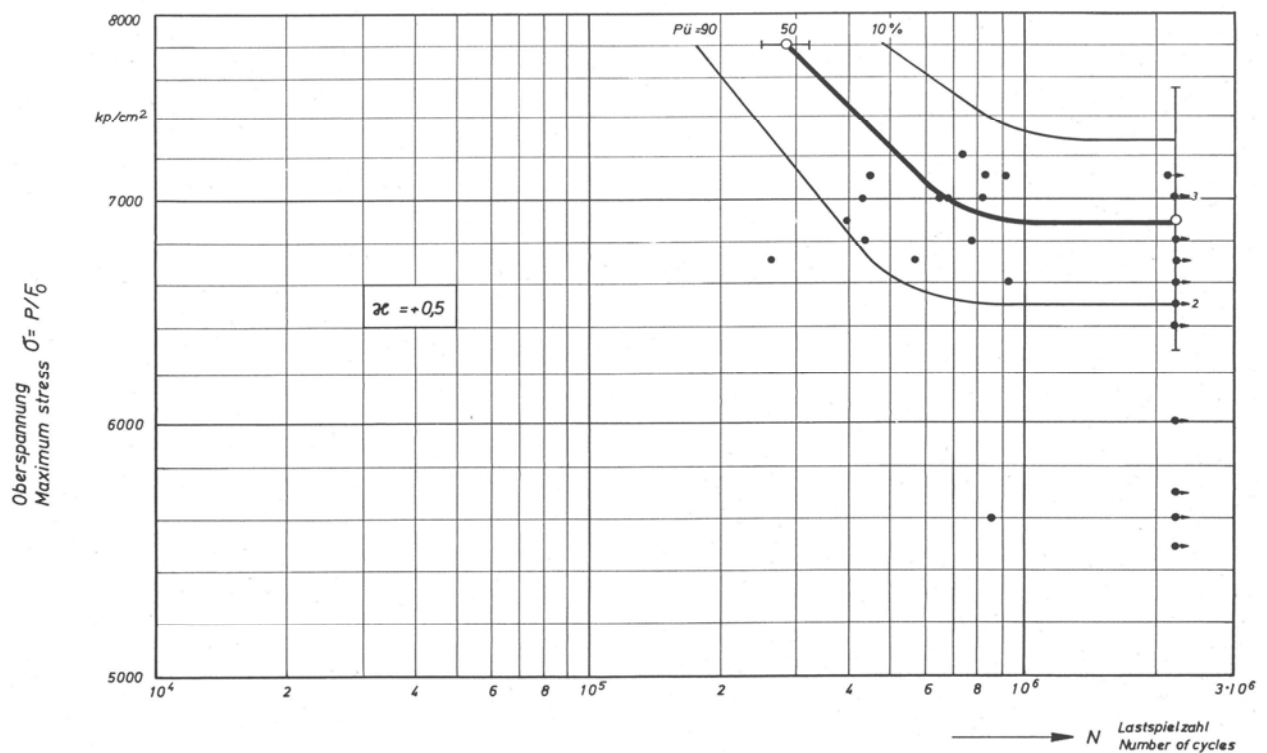


Abbildung 21: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 77V; aus [6]

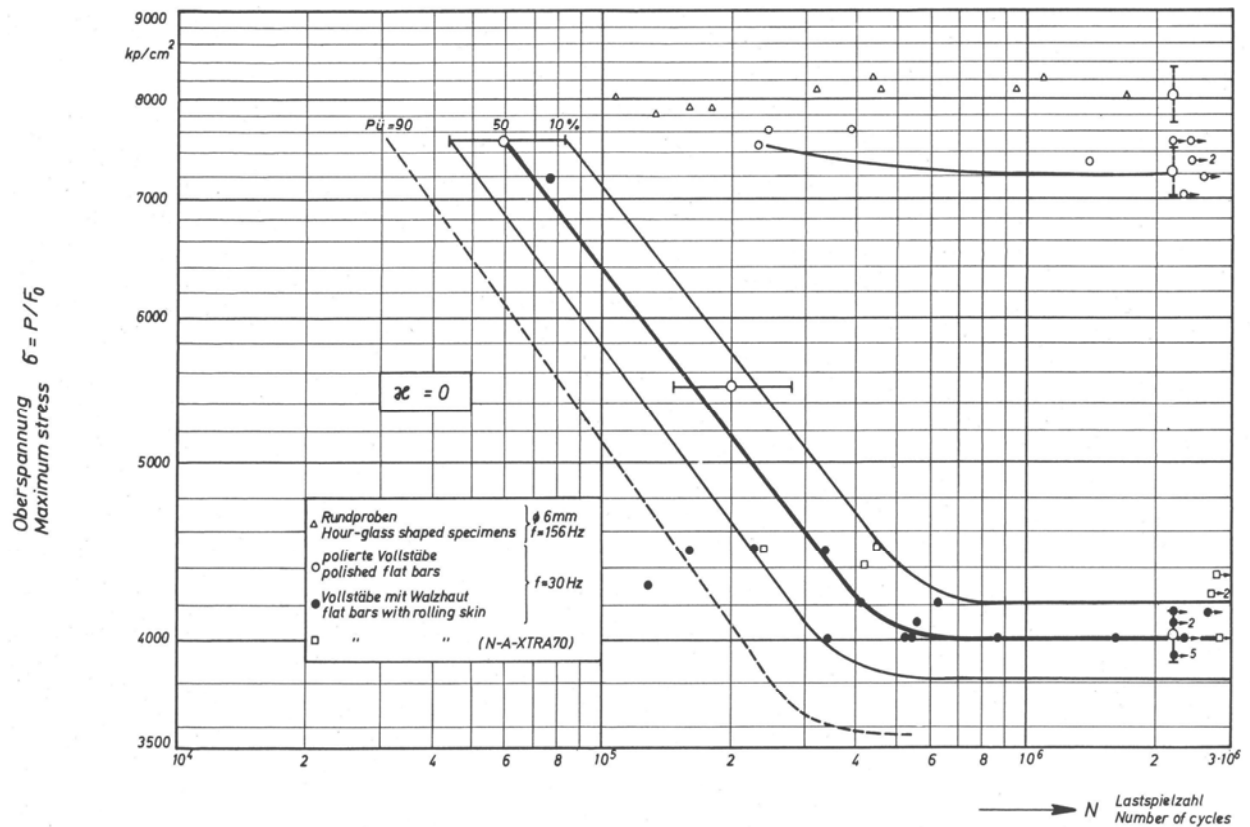


Abbildung 22: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 77V und N-A-XTRA 70; aus [6]

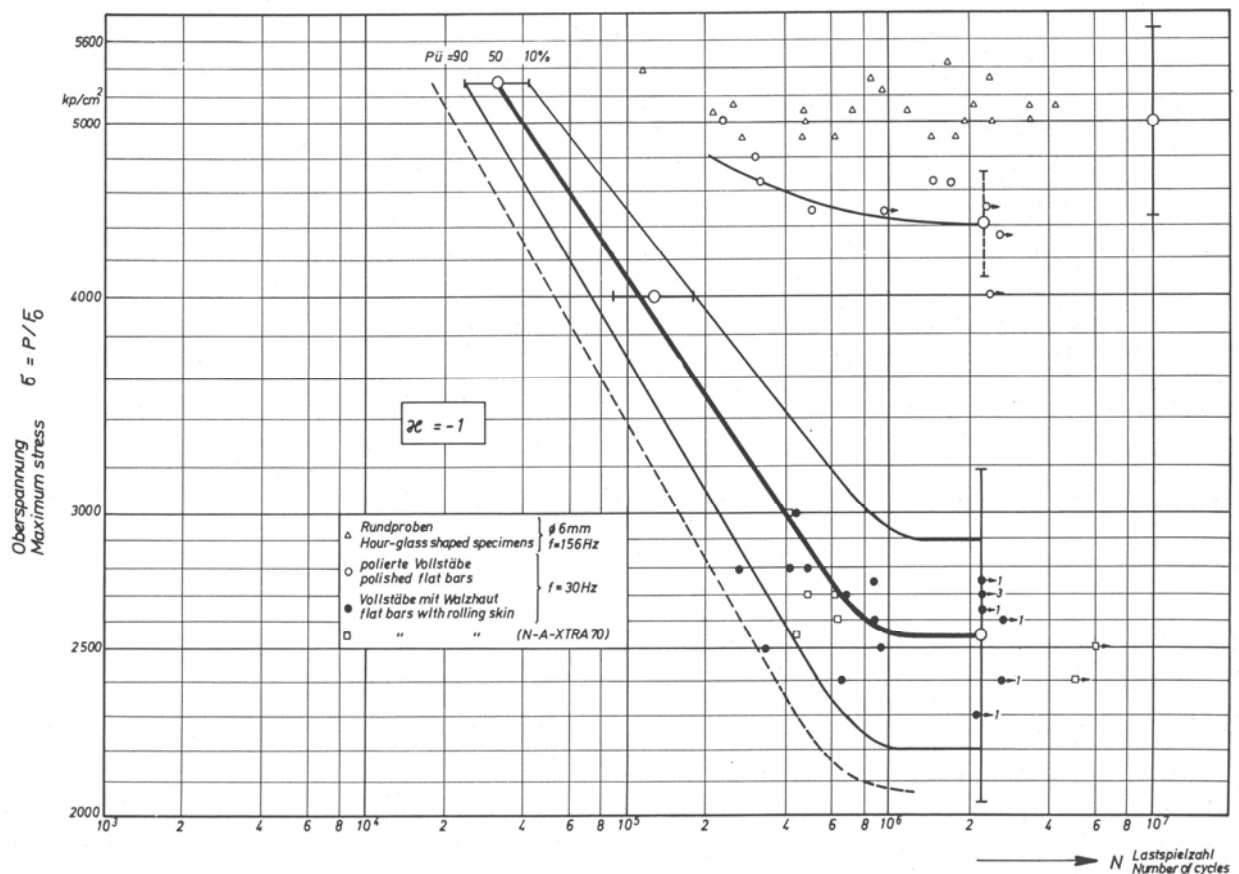
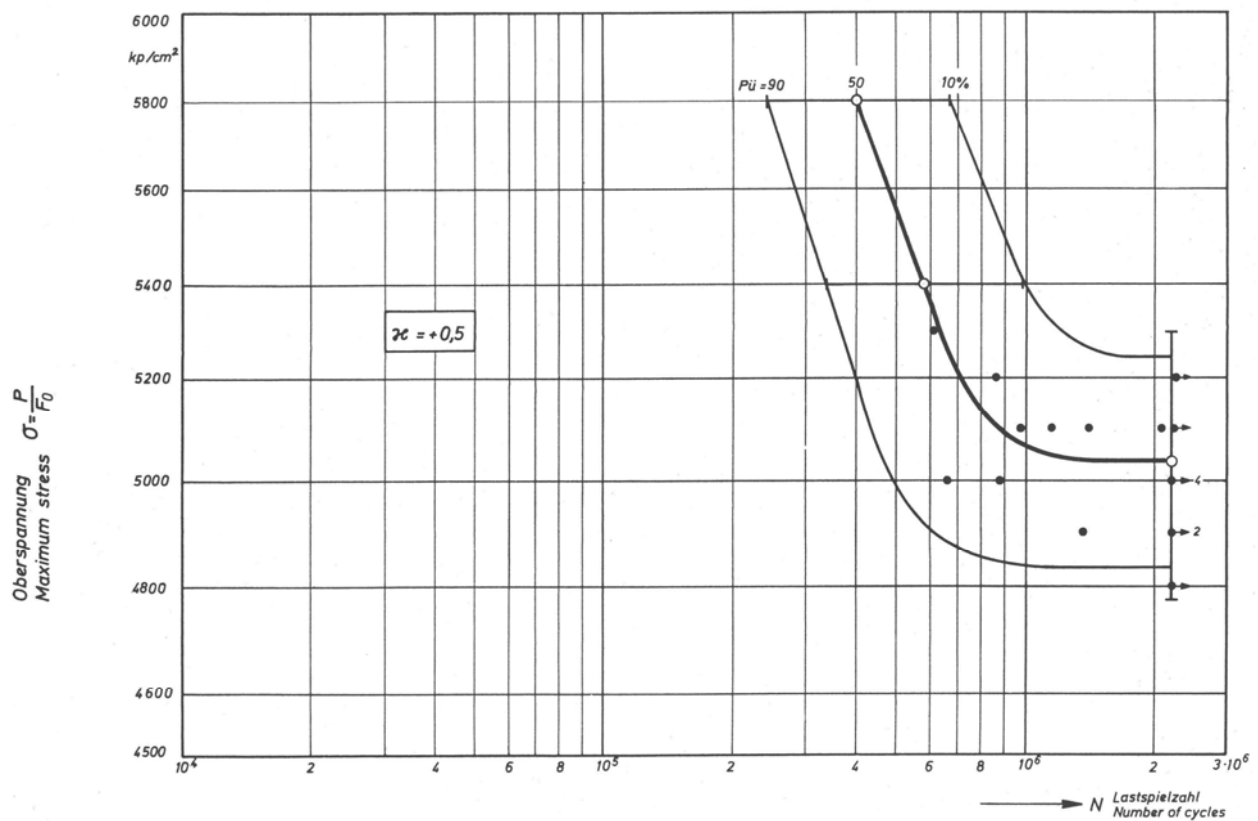
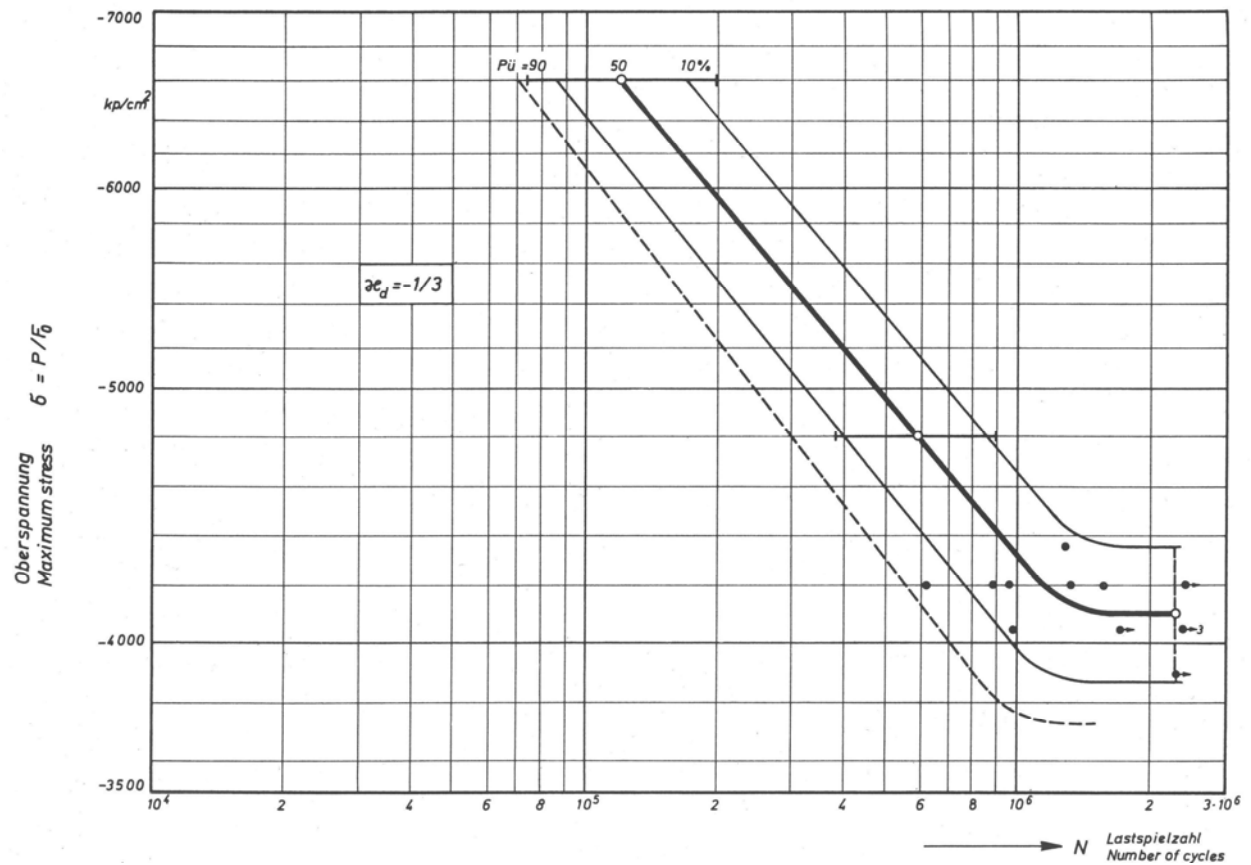


Abbildung 23: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 77V und N-A-XTRA 70; aus [6]



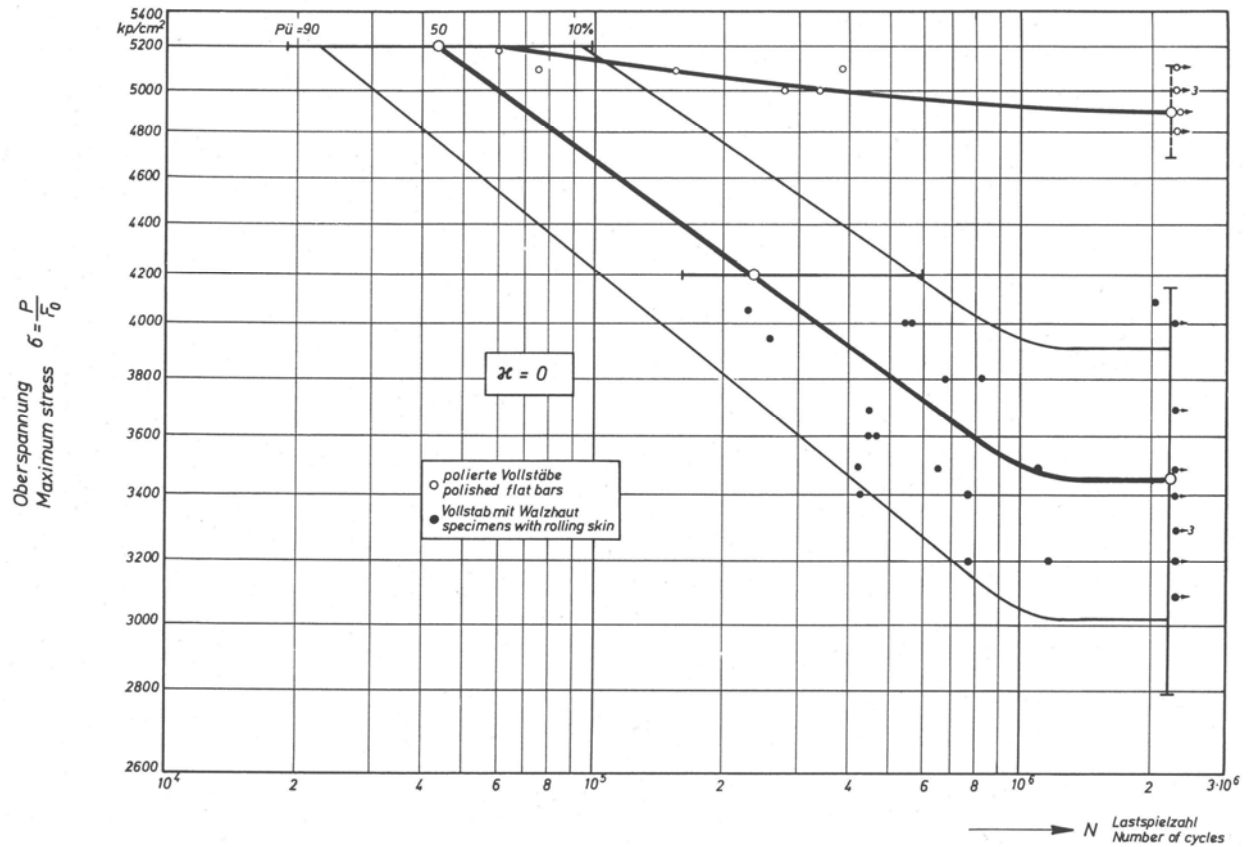


Abbildung 26: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 55C; aus [6]

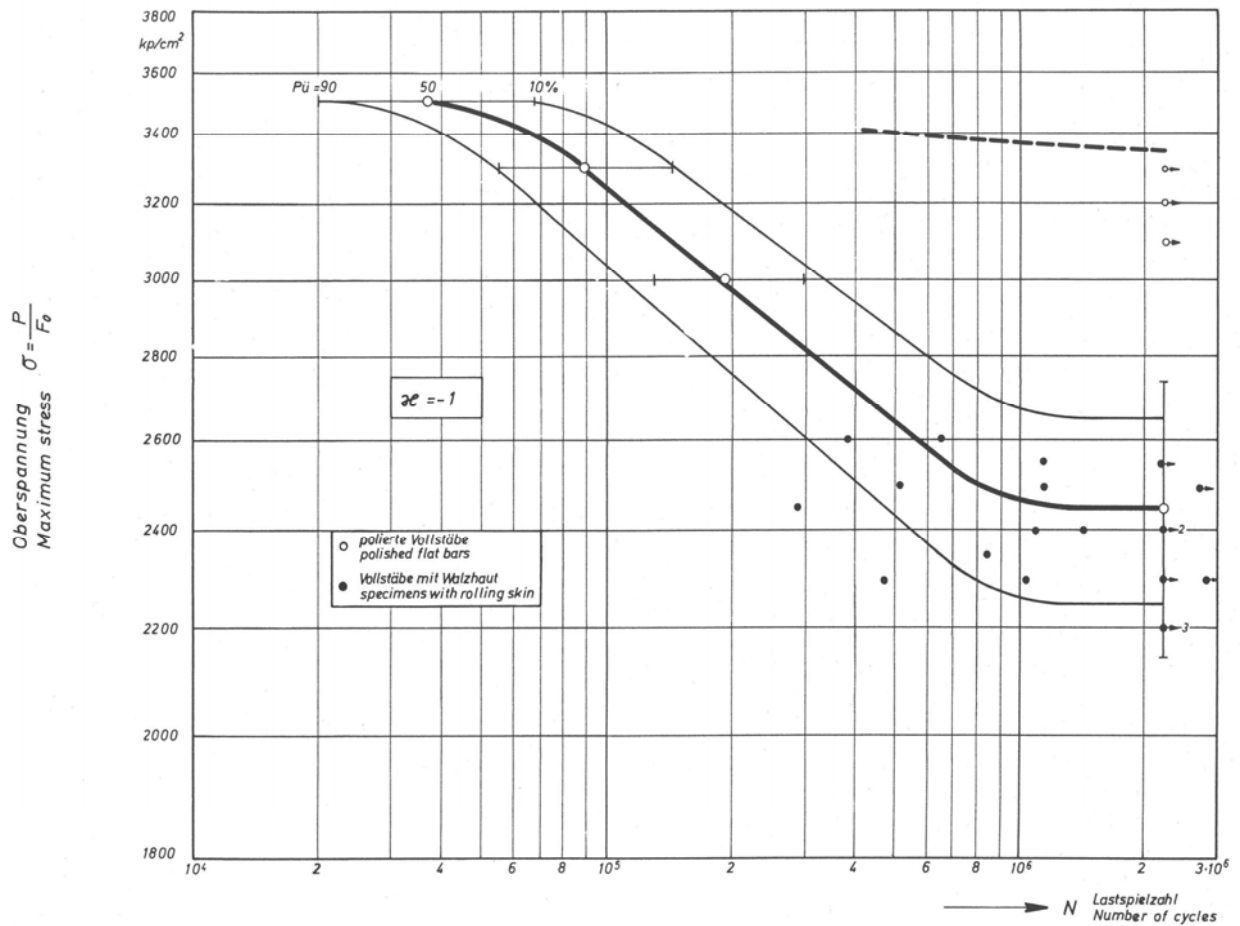


Abbildung 27: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 55C; aus [6]

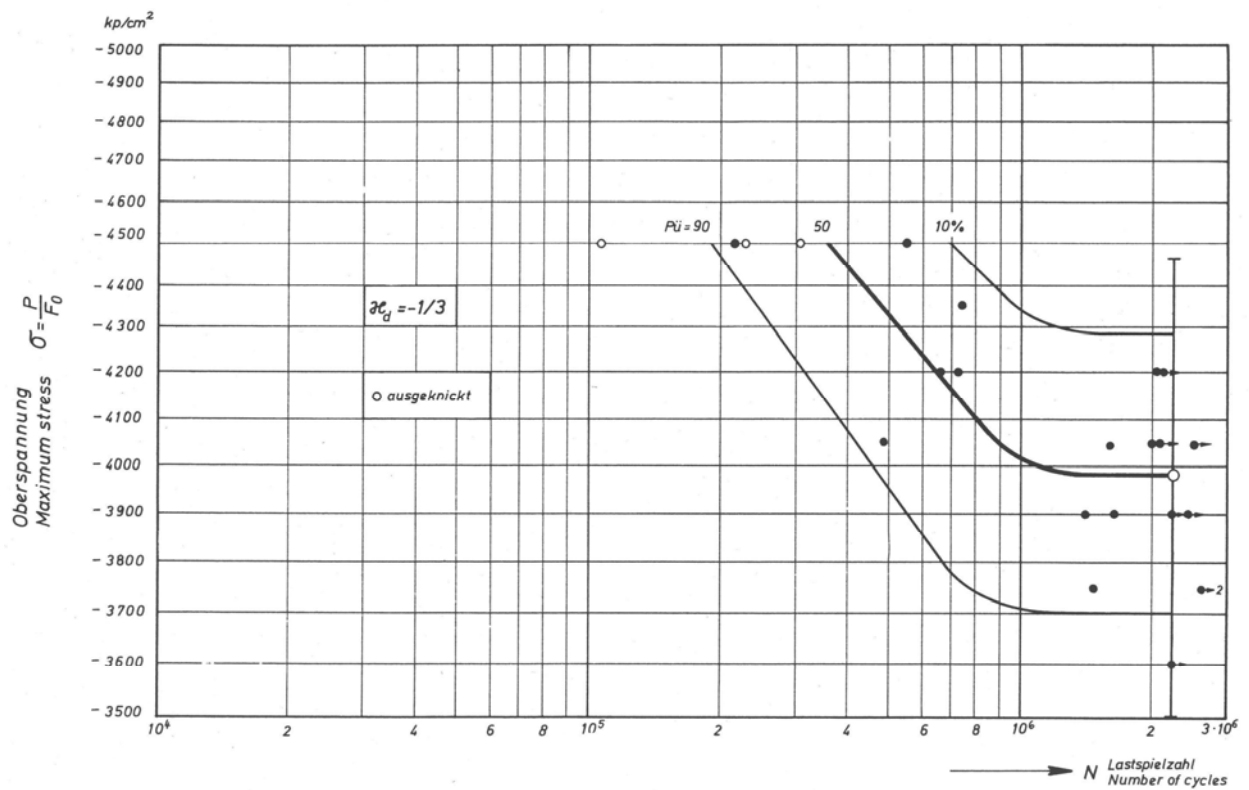


Abbildung 28: Einstufen-Dauerversuche mit Vollstäben aus HSB 55C mit Walzhaut; aus [6]

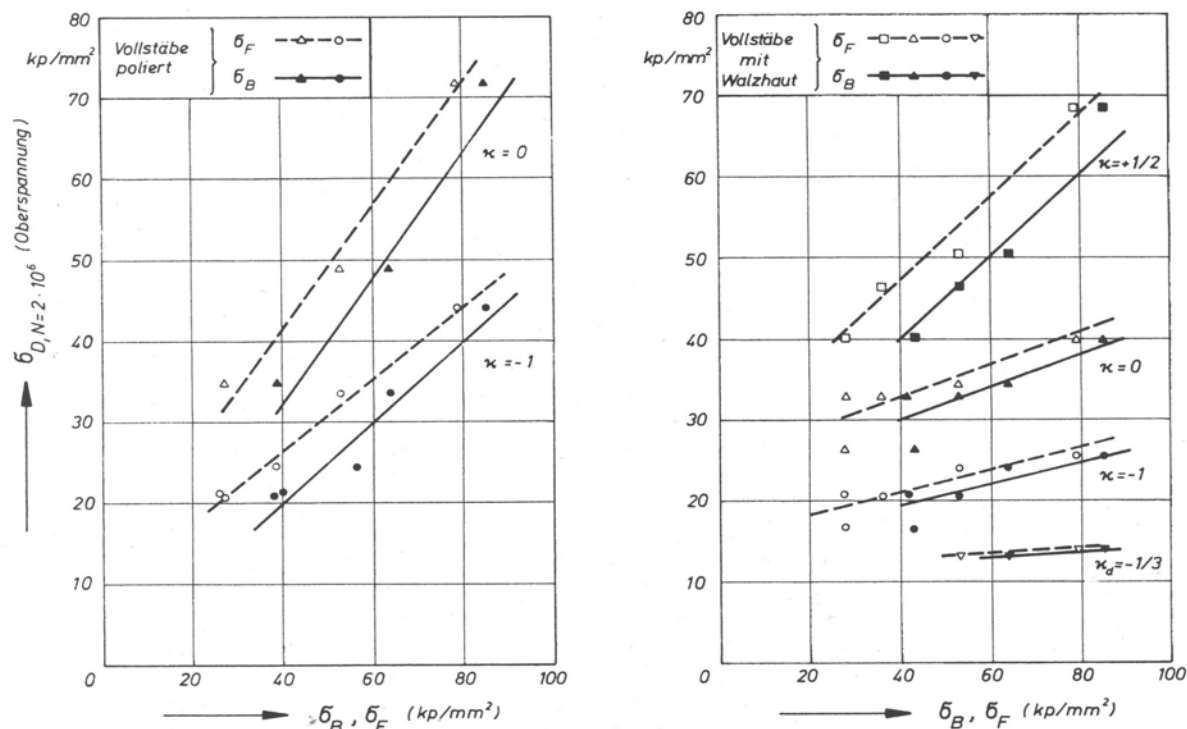


Abbildung 29: Dauerfestigkeit von Stahl in Abhängigkeit von Fließgrenze und Zugfestigkeit; aus [6]

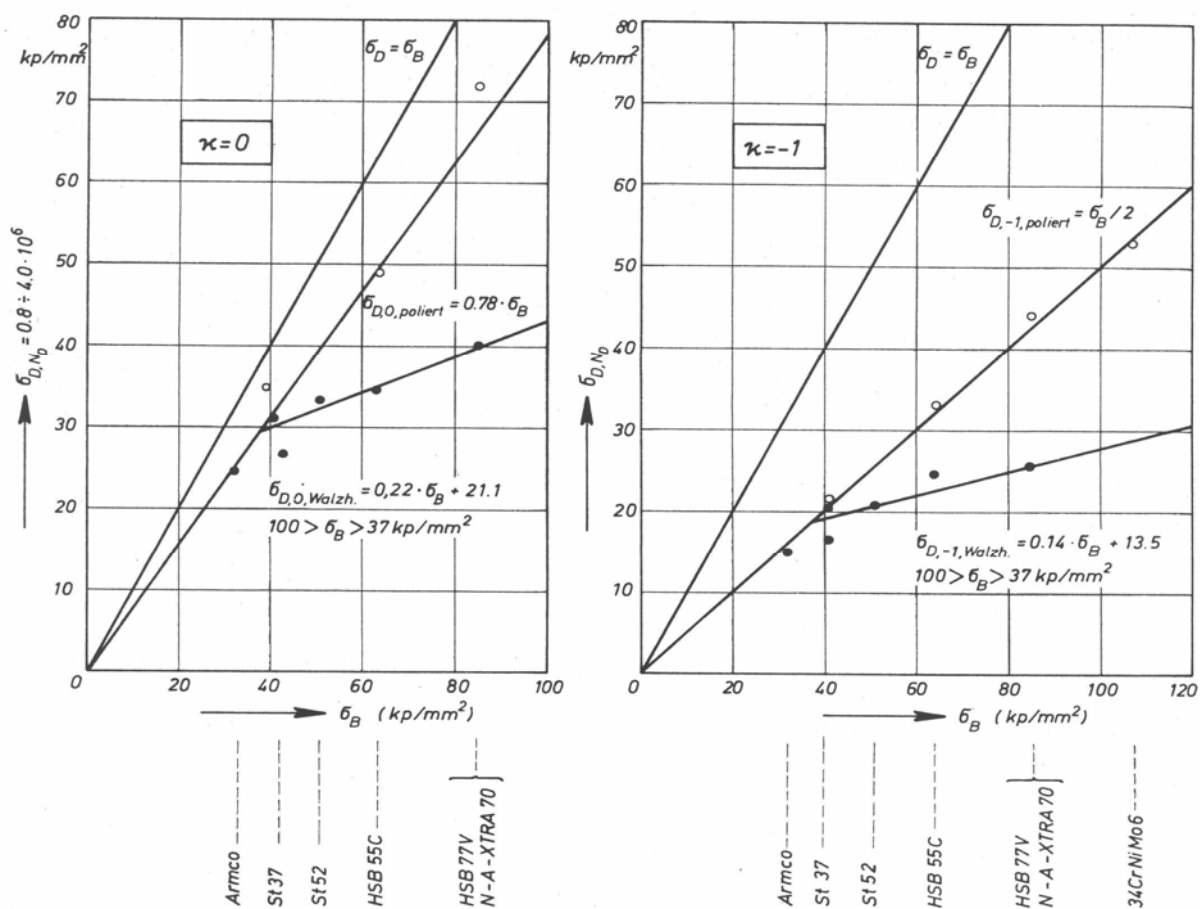


Abbildung 30:  $\sigma_{D,-1}$  bzw.  $\sigma_{D,0}$ -Werte für Stahl-Vollstäbe mit und ohne Walzhaut über  $f_{u,k} \equiv \sigma_B$ ; aus [6]

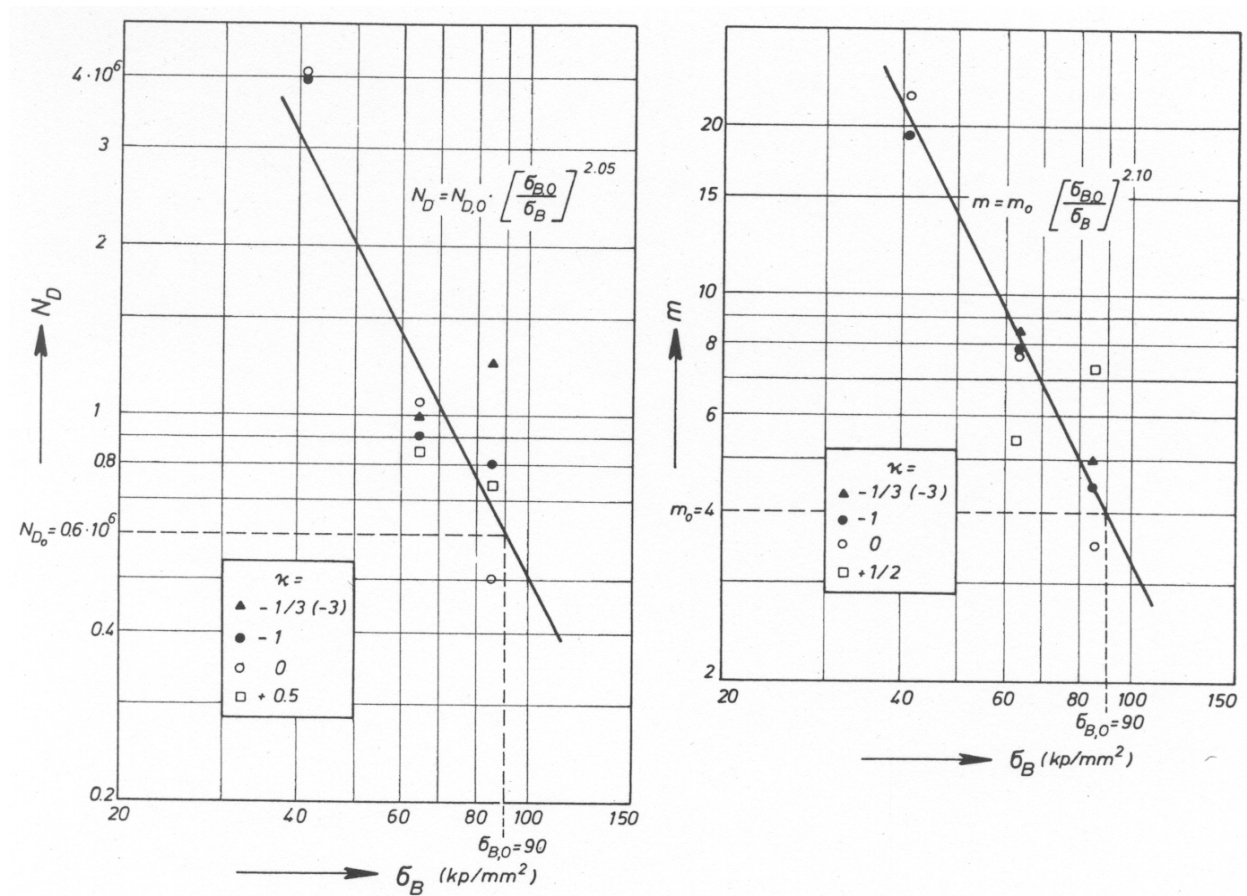


Abbildung 31:  $N_D$  und  $m$  von Stahl in Abhängigkeit von  $f_{u,k} \equiv \sigma_B$ ; aus [6]

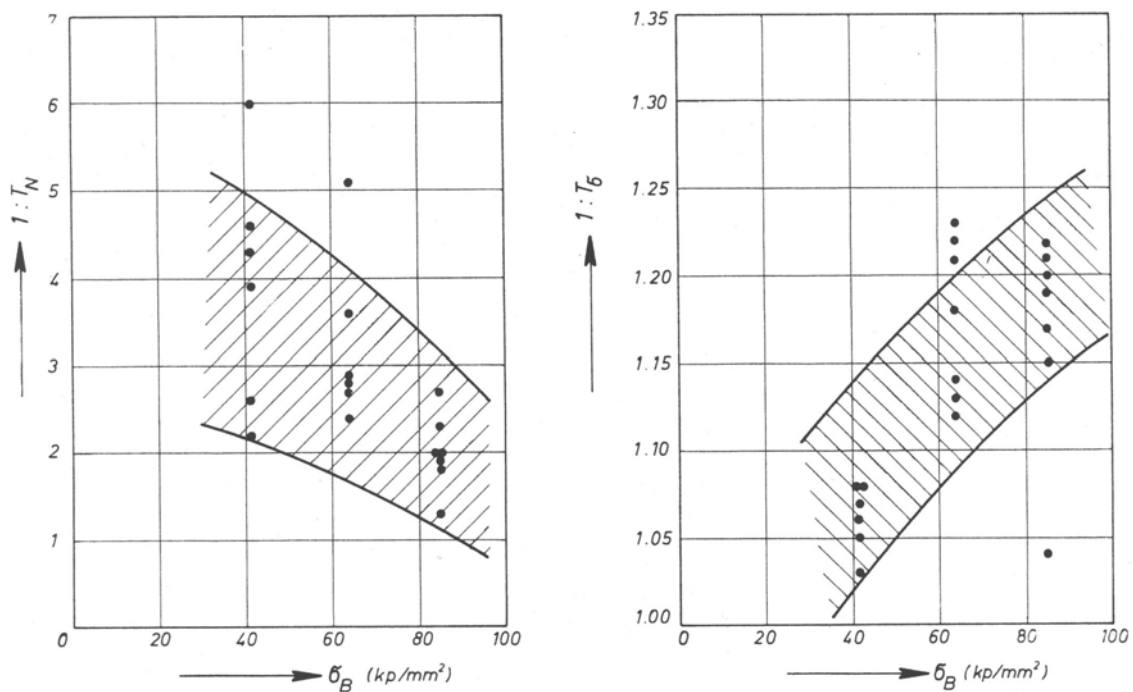


Abbildung 32: Streuungsverläufe der hochfesten Baustähle; aus [6]



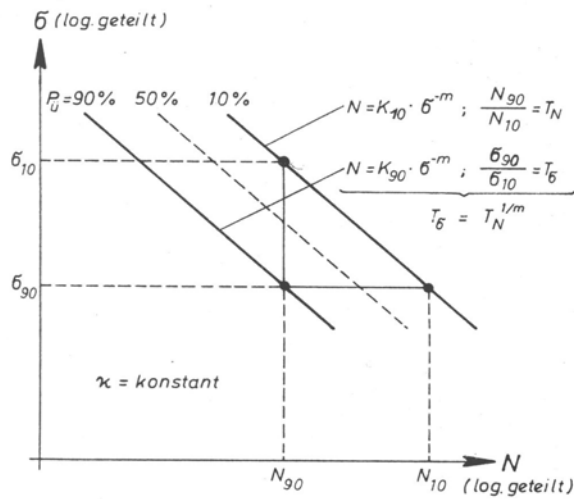


Abbildung 33: Lastspielzahlstreuung und Spannungsstreuung; aus [6]

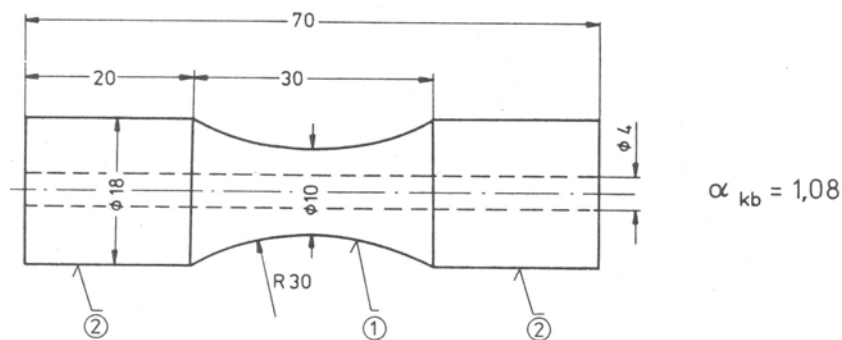


Abbildung 34: ungekerbte Rundproben; aus [13]

1) alle Radien nach dem Glühen geschliffen, 2) Einspannenden nach dem Sintern geschliffen

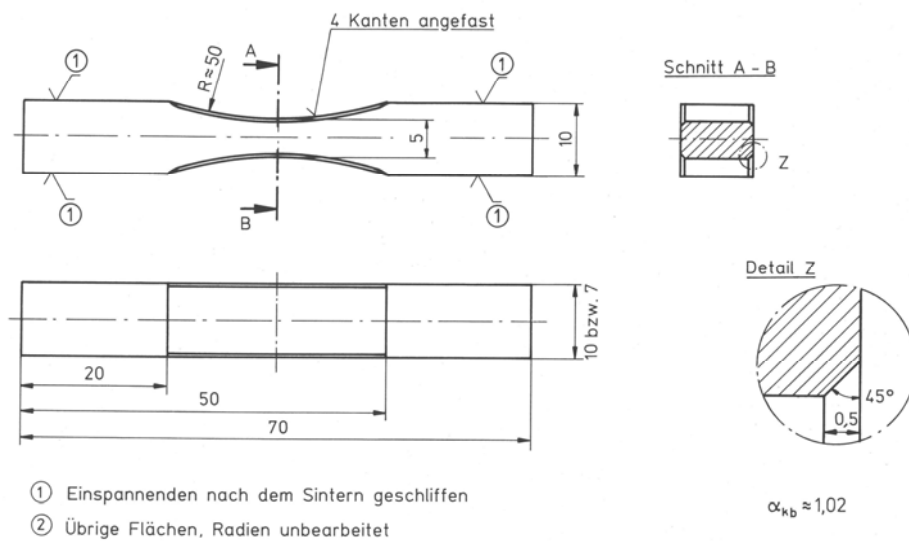
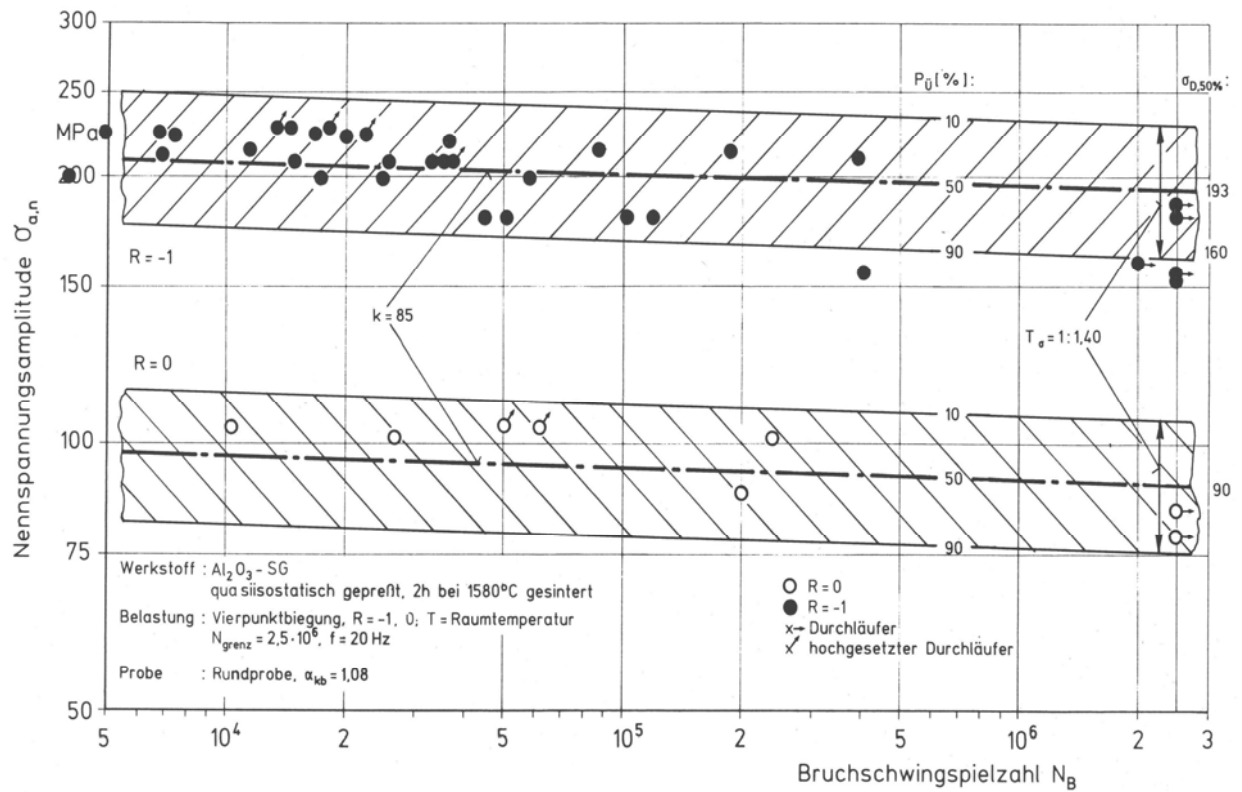
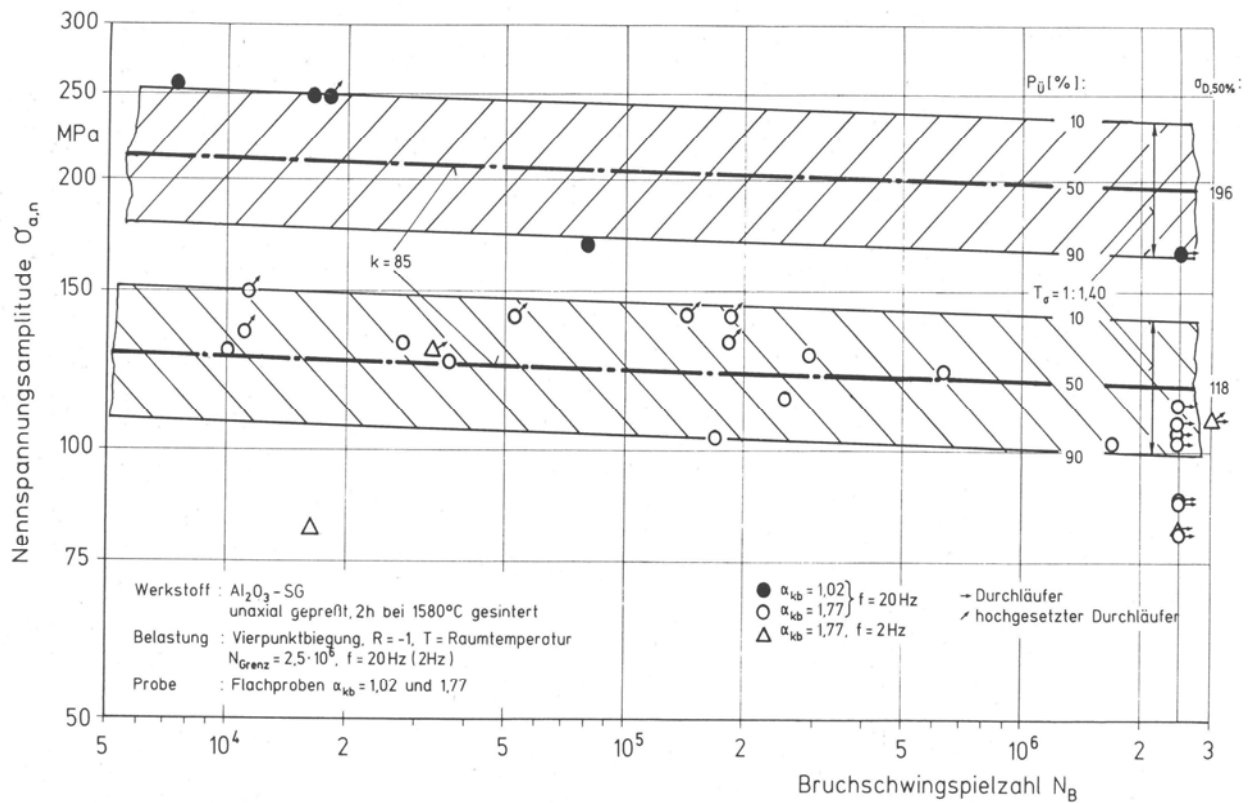


Abbildung 35: ungekerbte Flachproben; aus [13]

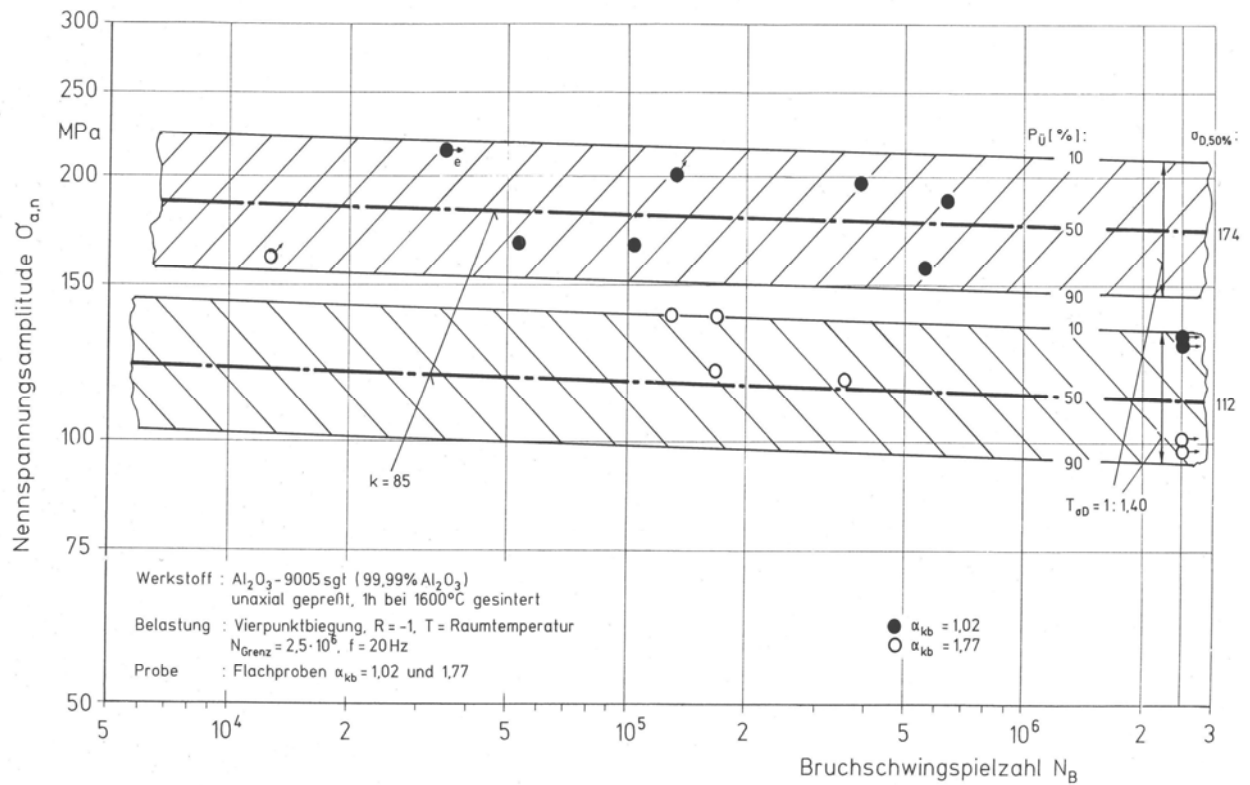
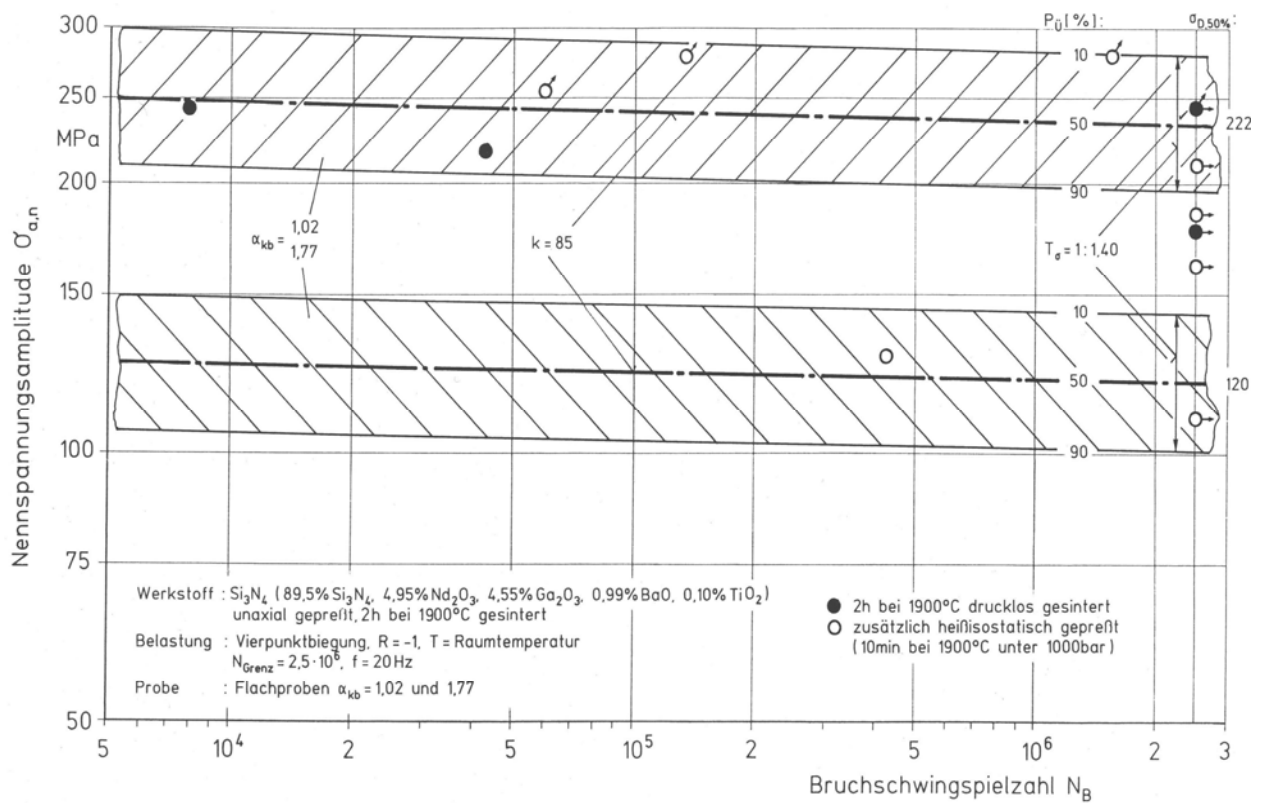


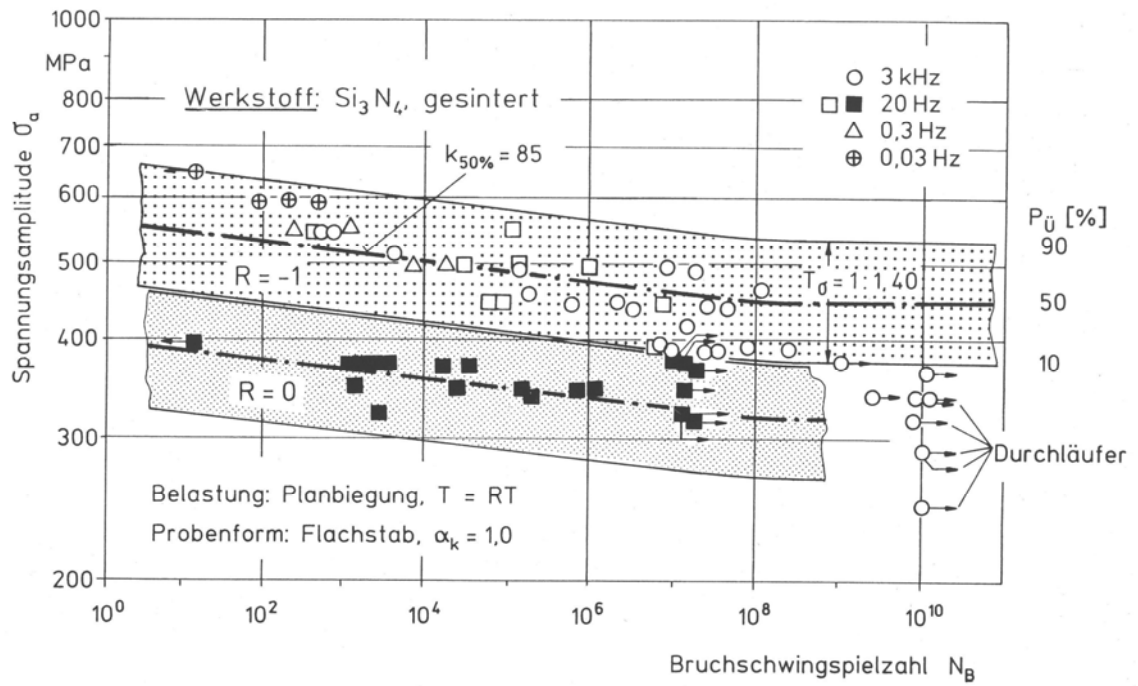
**Abbildung 36:** Wöhlerlinien von Keramikproben aus Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SG; aus [13]



**Abbildung 37:** Wöhlerlinien von Keramikproben aus Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SG; aus [13]

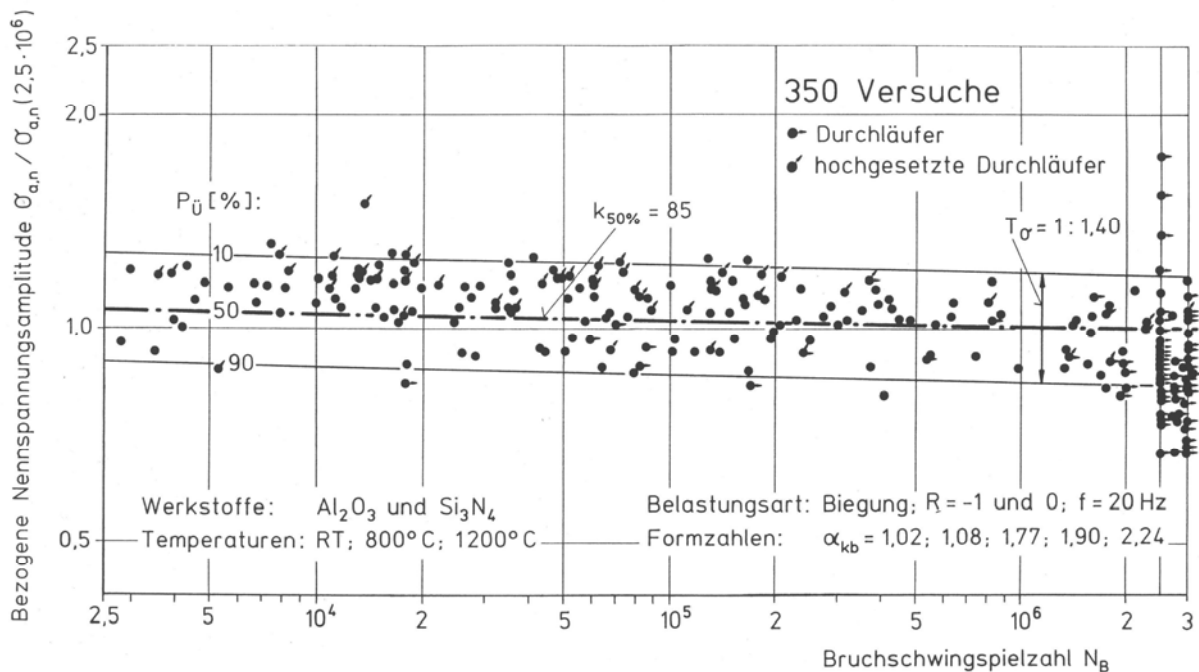


Abbildung 40: Wöhlerlinien von Keramikproben aus Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -9005 sgt; aus [13]Abbildung 41: Wöhlerlinien von Keramikproben aus Siliziumnitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; aus [13]



nach M. Masuda et. al.

Abbildung 42: Schwingfestigkeit einer Siliziumnitrid-Keramik; aus [13]

Abbildung 43: Bezogene Darstellung der Schwingfestigkeit von verschiedenen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken; aus [13]

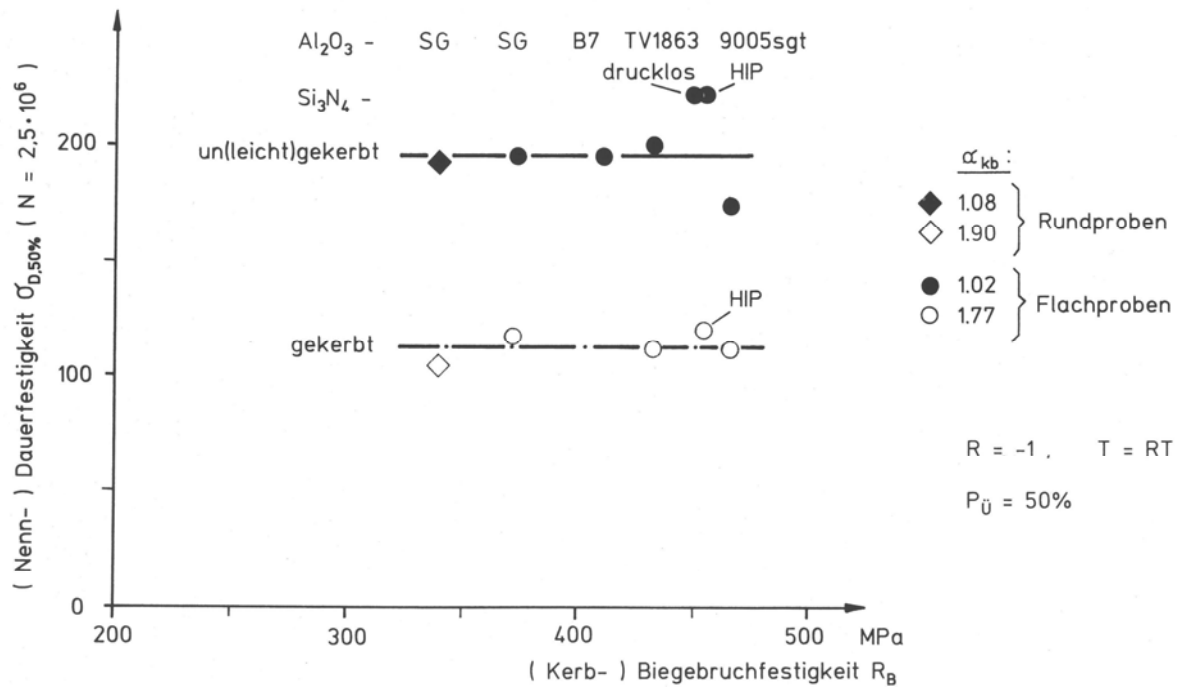


Abbildung 44: Dauerfestigkeit und Bruchfestigkeit der Keramiken; aus [13]

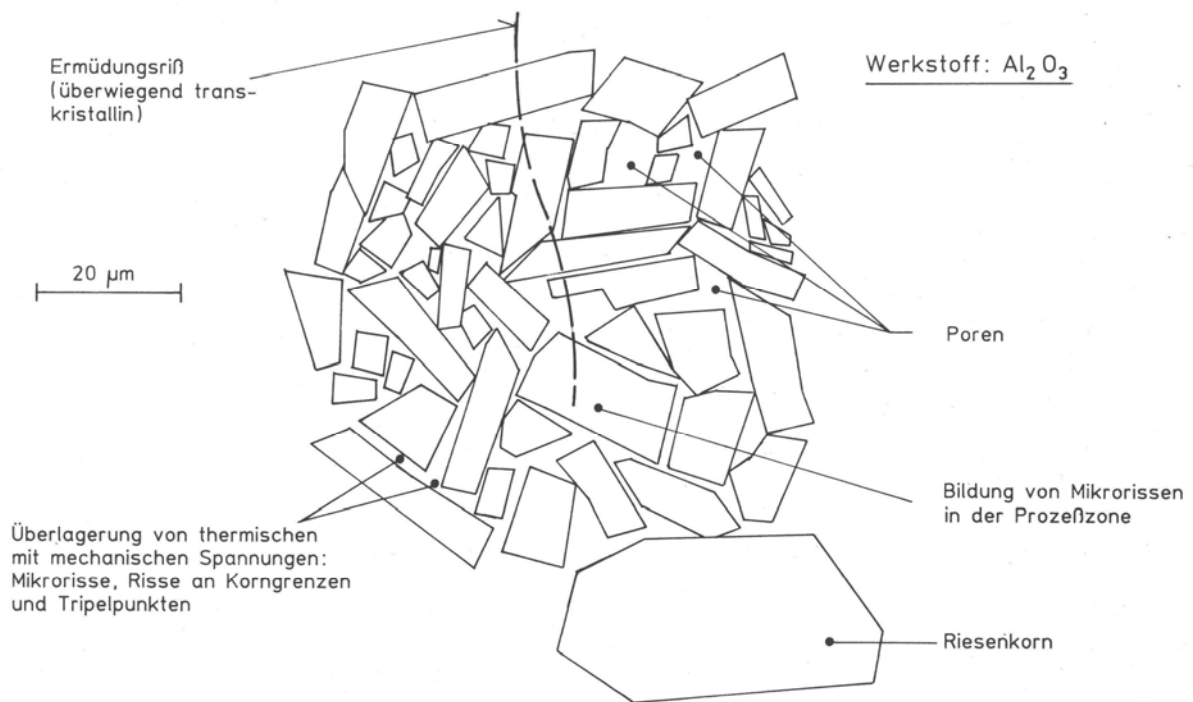
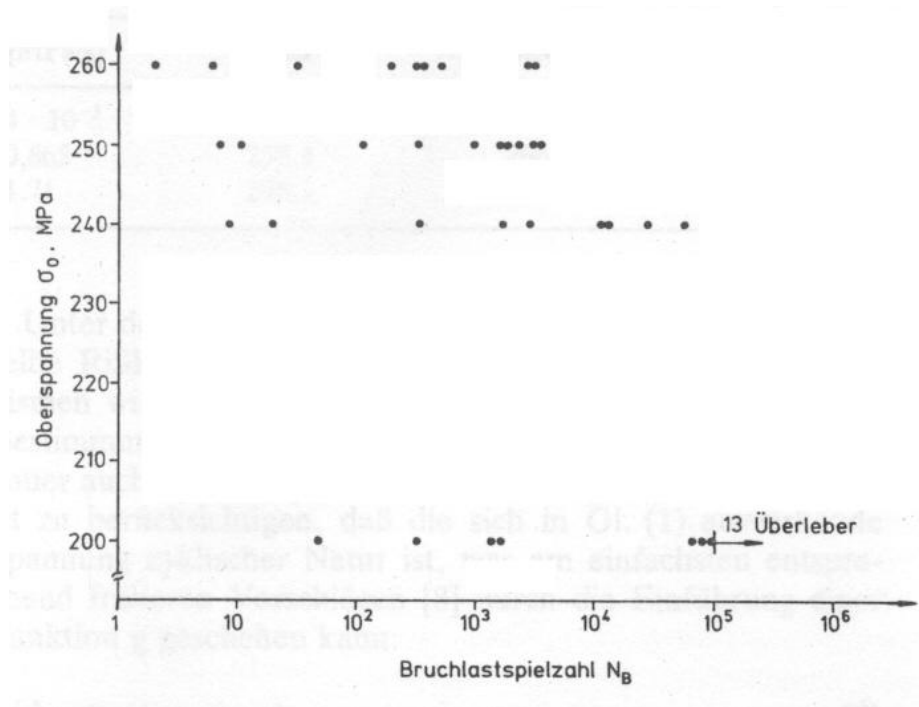
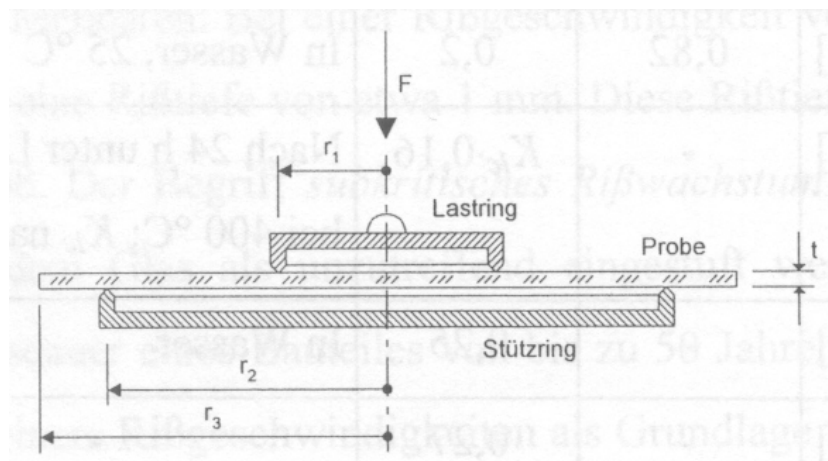


Abbildung 45: Gefüge und mögliche Rissvorgänge bei Keramiken; aus [13]



**Abbildung 46:** Wöhlerlinien-Ermittlung bei  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (RBSN); aus [17]



**Abbildung 47:** Prüfanordnung im Doppelring-Biegeversuch; aus [22]

$$r_1 = 300\text{mm} \quad r_2 = 400\text{mm} \quad r_3 = 0,6 \cdot L$$

## **Plaste unter zyklischer Beanspruchung**

„Der Wöhlerversuch ist auch bei Plasten die z.Z. übliche Methode zur Bestimmung der Dauerschwingfestigkeit. Die Versuchsauswertung wird dabei ebenso wie die Versuchsdurchführung durch werkstoffbedingte Besonderheiten beeinflusst. Aus dem Verlauf der Wöhlerlinien, besonders bei Zug-Schwellbeanspruchung, ist zu erkennen, dass mit steigender Schwingspielzahl die ertragbare Spannung stetig absinkt und somit kein asymptotisches Annähern an einen Grenzwert – die Grenzschningspielzahl – zu erwarten ist. Als technisch und ökonomisch vertretbare Grenzschningspielzahl ist  $N = 10^7$  allgemein üblich, bei der Versuchsauswertung sind alle Angaben mit der Schningspielzahl zu kennzeichnen“ ([9], 128).



